

Evaluation des Einsatzes eines Spuckstoffs aus dem Altpapierrecycling als Füllstoff in ausgewählten thermoplastischen Matrixsystemen

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades
der Ingenieurwissenschaften

vorgelegt von

Andrea Franziska Katharina Scholten

aus München

genehmigt von der
Fakultät für Natur- und Materialwissenschaften
der Technischen Universität Clausthal

Tag der mündlichen Prüfung
03.12.2019

Dekan

Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinz Spitzer

Vorsitzende/Vorsitzender der Promotionskommission

Prof. Dr.-Ing. habil. Joachim Deubener

Betreuer

Prof. Dr.-Ing. Dieter Meiners

Gutachter

Prof. Dr.-Ing. Daniel Goldmann

Hiermit erkläre ich an Eides Statt, dass ich die bei der Fakultät für Material- und Naturwissenschaften der Technischen Universität Clausthal eingereichte Dissertation selbständig und ohne unerlaubte Hilfe verfasst und die benutzten Hilfsmittel vollständig angegeben habe.

Andrea Scholten

Clausthal-Zellerfeld den 18.09.2019

Für meinen Vater, meine Mutter und meinen Ehemann

*„You helped me up when I was down,
You taught me how to stand my ground.”*

- Neele Ternes -

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Polymerwerkstoffe und Kunststofftechnik der Technischen Universität Clausthal.

Besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing Dieter Meiners, an den ich mich während der Anfertigung dieser Arbeit immer wenden konnte, der mir aber auch ausreichend Freiheit zur selbstständigen Bearbeitung und Interpretation des Themas eingeräumt hat. Er hat mir stets die Möglichkeit gegeben mich fachlich und überfachlich weiterzubilden, um optimal vorbereitet in das zukünftige Arbeitsleben zu starten.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Daniel Goldmann danke ich für die bereitwillige Übernahme des Koreferats, die fachlichen Anregungen im Bereich der Aufbereitung und die vielen, sehr inspirierenden Vorlesungsstunden, denen ich im Rahmen meines Promotionsstudiums beiwohnen durfte.

Weiterer Dank gilt aktuellen, wie auch ehemaligen Kollegen am Institut für Polymerwerkstoffe und Kunststofftechnik. Vor allem meinen zwischenzeitlichen Büronachbarn Saskia Müller, Anton Enns und Juliana Rivas möchte ich meinen herzlichsten Dank aussprechen. Ihr wart offene und hilfsbereite Diskussionspartner und habt mich bei vielen Herausforderungen mehr als nur kollegial unterstützt. Der Institutsalltag wäre ohne euch niemals so schön bunt gewesen.

Meinen Projekt-, Bachelor- und Masterarbeitern Ali Abdelfattah, Sönke Anschütz, Antony Antony, Rebecca Engelhardt, Sonja-Beatrice Lüer, Marit, Mathiszig, Niklas Plogmann, Henryk Ringel, Bahareh Safari Anaraki, Janina Schröder und Harun Tas danke ich für die tatkräftige Hilfe im Labor und die stete Diskussionsbereitschaft. Ihr habt viel zu dieser Arbeit beigetragen.

Für die Bereitstellung des Spuckstoffes möchte ich der Smurfit Kappa Herzberg Solid Board GmbH und insbesondere Herrn Jacobi und Herrn Picht danken. Weiterer Dank gilt Herrn Rowold von der

C2P Germany GmbH bzw. Recylex für die Bereitstellung der Recyclinggranulate aus PP und die sehr kurzen Antwortzeiten beim E-Mailverkehr. Für das PA-Rezyklat danke ich der Edelrid GmbH & Co. KG und vor allem Frau Selma Lohan.

Für eine wunderbare Studienzeit mit all ihren Höhen und Tiefen, wobei die Höhen klar überwogen haben, möchte ich meinen Freunden Martin Söftje, Alena Storm, Jonas Fortmann und Christopher Ehrhardt danken. Martin und Christopher gebührt zusätzlicher Dank, da wir auch fachlich gut harmoniert haben und meine IR-Proben und ich jederzeit im Institut für Organischen Chemie willkommen waren.

Meinen Freundinnen Lenka Knop, Nadine Hempel und Johanna Thöne danke ich für die langjährige Freundschaft, die sich auch mit leider viel zu seltenen Treffen so anfühlt, als wären hätten wir uns gestern noch in der Schule gesehen.

Meinen Eltern möchte ich dafür danken, dass sie mich auf meinem gesamten Lebensweg unterstützt und gefördert haben. Ohne euch und eure Liebe wäre ich nicht dort wo ich bin. Ich hoffe ihr seid stolz auf mich.

Zu guter Letzt möchte ich meinem Ehemann Tilman danken, der in hellen und dunklen Stunden an meiner Seite stand. Danke für deine stete Diskussionsbereitschaft zu fachlichen und darüber hinaus gehenden Themen.

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit behandelt die Untersuchung und Bewertung des Einsatzes eines so genannten Spuckstoffs aus dem Altpapierrecycling als Füllstoff und Verstärkungsmaterial für thermoplastische Kunststoffe. Obwohl Papier ein gut recycelbares Material ist, fallen beim Papierrecycling große Mengen Reststoffe an, die aktuell thermisch verwertet werden.

Zur Erzeugung eines Wertstoffes wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Spuckstoff mit verschiedenen thermoplastischen Kunststoffen compoundiert. Die entstandenen Verbunde wurden auf ihre mechanischen und thermischen Eigenschaften hin untersucht. Ein Vergleich mit bereits industriell eingesetzten naturfaserverstärkten Kunststoffen konnte zeigen, dass die Spuckstoff-Kunststoff-Compounds für ähnliche Anwendungen verwendbar sind und ein beinahe identisches Preis/Leistungs-Verhältnis bieten.

Zur Optimierung des Eigenschaftsprofils wurden verschiedene Aufbereitungsverfahren zur Abtrennung von lignocellulosischen Fasern und Störstoffen im Spuckstoff sowie der Einsatz von Haftvermittlern im Compound erprobt. Die aus diesen Verfahren gewonnenen Verbunde wurden ebenfalls umfassend charakterisiert und hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit betrachtet.

Abstract

The present thesis deals with the analysis and assessment of the use of a reject from waste paper recycling as a filler and reinforcement in thermoplastics. Although paper is a good recyclable material a large amount of rejects occur during waste paper recycling which are thermally recycled now.

To create a resource, one specific reject was compounded with different thermoplastics. The received compounds were analysed regarding their mechanical and thermal properties. Comparisons with industrial used natural fiber reinforced plastics showed that the reject compounds could be used for similar applications and offer a nearly identical cost/performance ratio.

For the optimization of the compound properties different treatments to separate the lignocellulosic fibers from impurities and also the use of coupling agents were tested. The compounds gained from these procedures were characterised as well and examined regarding their economic feasibility.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Technische Grundlagen	3
2.1	Papier und Papierrecycling	3
2.1.1	Die Geschichte der Papiererzeugung	3
2.1.2	Rohstoffaufbereitung und -zerkleinerung	6
2.1.3	Recycling von Altpapier - Stofflösung und Abtrennung im wässrigen Medium	10
2.2	Kunststoffe und Kunststoffverarbeitung	15
2.2.1	Thermoplastische Kunststoffe	16
2.2.2	Faserverstärkte Kunststoffe	17
2.2.3	Compoundierung und Spritzguss	21
3	Stand der Wissenschaft	26
3.1	Rückstände aus der Altpapierverwertung – Einsatzmöglichkeiten und Problemstellungen	26
3.2	Einsatz von Papier als Füllstoff und Verstärkung in Kunststoffen	28
4	Analytische Methoden	35
4.1	Mechanische Eigenschaften	35
4.1.1	Zugversuch	36
4.1.2	Schlagbiegeversuch nach CHARPY	38
4.2	Thermische Eigenschaften	39
4.2.1	Dynamische Differenzkalorimetrie (DSC)	40
4.2.2	Thermogravimetrische Analyse (TGA)	42
4.2.3	Wärmeleitfähigkeitsmessung	45
4.2.4	Bestimmung des Fließverhaltens	46
4.3	Sonstige Eigenschaften	48
4.3.1	Wasseraufnahmeverhalten	48
4.3.2	Schimmelpilzresistenz	49

4.3.3	Faserlängenbestimmung (μ -CT, QicPic, Mikroskopie)....	52
4.3.4	ATR-Infrarotspektroskopie.....	54
5	Charakterisierung des Spuckstoffes	57
6	Evaluation der Compounds.....	65
6.1	Kombination von Spuckstoff und neuem Kunststoff	65
6.1.1	Ausgangsmaterialien	65
6.1.2	Verarbeitung	67
6.1.3	Eigenschaften der Compounds	70
6.1.4	Kostenabschätzung und Anwendungsbeurteilung	95
6.2	Kombination von Spuckstoff und Recyclingkunststoff	109
6.2.1	Ausgangsmaterial	109
6.2.2	Verarbeitung	112
6.2.3	Eigenschaften der Compounds	113
6.2.4	Kostenabschätzung und Anwendungsbeurteilung	129
6.3	Referenzmaterialien	132
6.3.1	Ausgangsmaterialien	132
6.3.2	Verarbeitung	134
6.3.3	Eigenschaften der Compounds	135
6.3.4	Kostenabschätzung und Anwendungsbeurteilung	147
7	Eigenschaftsoptimierung der Spuckstoffcompounds.....	153
7.1	Eigenschaftsoptimierung durch Aufbereitung des Spuckstoffes.....	153
7.1.1	Ausgangsmaterial	153
7.1.2	Aufbereitung des Spuckstoffes und Verarbeitung	154
7.1.3	Eigenschaften der Compounds	173
7.1.4	Kostenabschätzung und Anwendungsbeurteilung	189
7.2	Eigenschaftsoptimierung durch Zugabe von Additiven.....	192
7.2.1	Ausgangsmaterialien	192
7.2.2	Verarbeitung	193

7.2.3	Eigenschaften der Compounds.....	194
7.2.4	Kostenabschätzung und Anwendungsbeurteilung.....	204
8	Vergleich der Spuckstoff-Compounds mit den Referenzmaterialien	208
8.1	Mechanische Eigenschaften.....	208
8.2	Thermische Eigenschaften	214
8.2.1	Schmelz- und Kristallisationsverhalten	214
8.2.2	Thermische Zersetzung	216
8.2.3	Wärmeleitfähigkeit	217
8.2.4	Fließverhalten	218
8.3	Sonstige Eigenschaften.....	221
8.3.1	Wasseraufnahme.....	221
8.3.2	Schimmelpilzresistenz	222
8.4	Kosten und Anwendungen	224
9	Zusammenfassung	237
10	Ausblick	239
11	Verzeichnisse	241
11.1	Literaturverzeichnis	241
11.2	Abbildungsverzeichnis.....	250
11.3	Tabellenverzeichnis	263
12	Anhang	265

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erläuterung
ATR-IR	Attenuated Total Reflectance Infrarotspektroskopie
CFK	Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe
DSC	Differential Scanning Calorimetry (Dynamische Differenzkalorimetrie)
DSM	Deutsche Sammlung für Mikroorganismen
EPS	expandiertes Polystyrol
FVK	faserverstärkte Kunststoffe
HD	High Density (hohe Dichte)
HDPE	Polyethylen hoher Dichte
HDT	Heat deflection temperature (Wärmeformbeständigkeitstemperatur)
LDPE	Polyethylen geringer Dichte
MAPP	Maleinsäureanhydrid gepropftes Polypropylen
MEA	Monoethanolamin
MFI	Melt flow index (Schmelzflußindex)
MFR	Melt flow rate (Schmelzflußrate)
µ-CT	Mikrocomputertomographie
NFK	naturfaserverstärkte Kunststoffe
PA	Polyamid
PA 6	Polyamid 6
PE	Polyethylen
PLA	Polylactid acid (Polymilchsäuren)
PP	Polypropylen
PS	Polystyrol
PVC	Polyvinylchlorid
rPA	Recycling-Polyamid
rPP	Recycling-Polypropylen
SCC	Synthetic calcium carbonate (synthetisches Calciumcarbonat)
TCA	Thermal conductivity analysis (Wärmeleitfähigkeitsanalyse)
TGA	thermogravimetrische Analyse
WPC	Wood Plastics Composites (Holz-Kunststoff-Verbunde)
w-%	Gewichtsprozent

Symbolverzeichnis

Symbol	Bezeichnung	Dimension
α	Ausgangswinkel beim Schlagversuch	°
β	Endwinkel beim Schlagversuch	°
δ	HANSEN-Löslichkeitsparameter	MPa ^{0,5}
ε_b	Bruchdehnung	%
ε_{tb}	nominelle Bruchdehnung	%
ε_y	Streckdehnung	%
λ	Wärmeleitfähigkeit	W/Km
σ_b	Bruchspannung	MPa
σ_y	Streckspannung	MPa
φ	Faservolumengehalt	%
Φ	Wärmestrom	W
E	Elastizitätsmodul	MPa
ΔE	Verdampfungsenergie	J
ΔE_D	Dispersionsenergie	J
ΔE_H	Energie der Wasserstoffbrückenbindungen	J
ΔE_P	Energie der Dipol-Dipol-Wechselwirkungen	J
E_T^N	Polaritätsparameter	-
h	Endhöhe des Hammers im Schlagversuch	
h'	Ausgangshöhe des Hammers im Schlagversuch	
H_m	Schmelzenthalpie	J/g
l	Länge des Hammers im Schlagversuch	
R_a	Abstand zum Punkt A	MPa ^{0,5}
R_0	Löslichkeitsradius	MPa ^{0,5}
T_g	Glasübergangstemperatur	°C
T_k	Kristallitbildungstemperatur	°C
T_m	Schmelztemperatur	°C
ΔT	Temperaturdifferenz	°C
V_m	molares Volumen	l/mol

1 Einleitung

Seit 1900 hat sich die Weltbevölkerung mehr als vervierfacht [1]. Prognosen der Vereinten Nationen gehen davon aus, dass die Bevölkerung bis zum Jahr 2100 um weitere 60 % auf ca. 11,2 Milliarden Menschen ansteigt [2]. Dieses Wachstum stellt unsere Gesellschaft vor zwei Herausforderungen:

- Eine drohende Rohstoffverknappung durch steigenden Konsum
- und
- ein erhöhtes Abfallaufkommen durch Produktions- und Haushaltsabfälle.

Diese beiden Herausforderungen zeigen den zwingenden Bedarf für neuartige und ganzheitliche Recyclinglösungen sowie neue Denkansätze in allen Industriezweigen.

Bei vielen Materialklassen, wie Metallen und Gläsern, ist ein ganzheitliches Recycling bereits im großtechnischen Maßstab implementiert. Auch in der Papierindustrie kann bereits heutzutage der Rohstoffbedarf größtenteils durch Recyclingmaterial gedeckt werden. Trotzdem gibt es allein in Deutschland über 30.000 t/a Abfälle aus dem Papierrecycling [3], für die aufgrund von Querkontamination mit anderen Stoffen aktuell außer der thermischen Verwertung keine Weiternutzung etabliert ist.

Die vorliegende Arbeit leistet einen Beitrag zur Lösung dieses Abfallproblems. Dies erfolgt durch die strukturierte Untersuchung der Einsatzmöglichkeiten eines faserhaltigen Spuckstoffs aus dem Altpapierrecycling als Füllstoff für thermoplastische Matrixsysteme. Der sonst als heterogener Reststoff behandelte Spuckstoff wird dadurch einer weiteren werkstofflichen Nutzung zugeführt („Upcycling“). Im Zuge dieser Materialaufwertung entsteht die Möglichkeit sowohl Kunststoffe auf Erdölbasis als auch für die Verstärkung dieser Kunststoffe hergestellte Fasern (z.B. Naturfasern) zu substituieren. Außerdem können durch Kombinationen mit recycelten

Kunststofffraktionen vollständige Recycling-Verbundwerkstoffe erzeugt werden, die unter dem Gesichtspunkt der Vermarktung und des immer weiter steigenden Umweltbewusstseins der Bevölkerung von Interesse sind.

Um den Nutzen von thermoplastischen Compounds mit Spuckstoff als Füllstoff abschätzen zu können, werden die Materialeigenschaften der neuen Werkstoffverbundklasse detailliert betrachtet. Als Referenz werden ausgewählte naturfaserverstärkte Thermoplaste verwendet, da Naturfasern dem Spuckstoff in ihrer Struktur ähneln und bereits industriell eingesetzt werden. Somit wird ein direkter Vergleich ermöglicht, aus dem wiederum auf bereits existente Anwendungsfälle geschlossen werden kann. Vor dem Hintergrund der Idee des „Design from Recycling“ [4] werden aufgrund der ermittelten Materialeigenschaften mögliche Einsatzszenarien dargelegt.

Als Ziel dieser Arbeit gilt es herauszufinden, ob zum heutigen Zeitpunkt durch die Nutzung von Spuckstoff als Füllstoff unter Berücksichtigung von Materialeigenschaften sowie der Wirtschaftlichkeit konkurrenzfähige Produkte erzeugt werden können.

2 Technische Grundlagen

2.1 Papier und Papierrecycling

Der jährliche Papierverbrauch in Deutschland lag 2015 bei ca. 23 Mio. Tonnen [5]. Bei einer Bevölkerung von ca. 80 Mio. Menschen verbraucht jeder Deutsche damit über 280 kg Papier, Pappe und Karton pro Person pro Jahr. Dies ist nicht nur im steigenden Einsatz von Verpackungsmaterial begründet, sondern auch in dem Mitteilungsbedürfnis der Menschen [6]. Ein Blick in die historische Entwicklung des Papiers und der Papierherstellung zeigt, wie es zu diesem relativ hohen Verbrauch kommt und welche Rohstoffe diesen decken.

2.1.1 Die Geschichte der Papiererzeugung

Die Erfindung des Papiers wird dem chinesischen Hofbeamten TSAI LUN zugesprochen (siehe Abbildung 2.1), der im Jahre 105 n. Chr. aus „Baumrinde, Hanf, alten Lumpen und Fischernetzen“ zum ersten Mal ein mit Tinte beschreibbares Flächengebilde hergestellt haben soll [7].



Abbildung 2.1: Tsai Lun, der Erfinder des Papiers [8]

Die Kunst des Papiermachens wurde unter anderem durch verschiedene kriegerrische Auseinandersetzungen von China über Samarkand (8. Jahrhundert), Syrien (9. Jahrhundert) und das

heutige Ägypten (10. Jahrhundert) nach Nordafrika (11. Jahrhundert) und von dort aus nach Südeuropa (13. Jahrhundert) gebracht (siehe Abbildung 2.2) [7], [9]. Die erste deutsche Papiermühle entstand 1390 in Nürnberg.

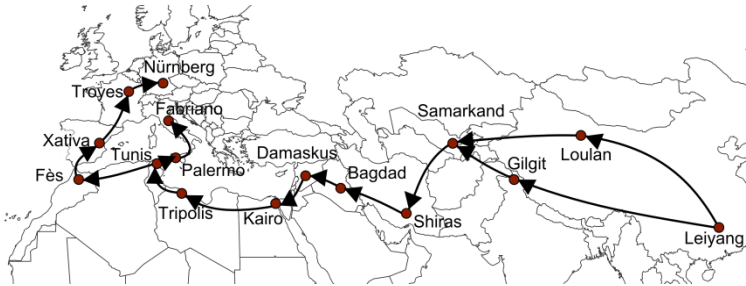


Abbildung 2.2: Ausbreitung der Papierherstellung von China nach Europa (in Anlehnung an [7])

Als Rohstoff für Papier wurden anfangs hauptsächlich „Lumpen“ oder „Hader“, also Altkleider verwendet, die gesammelt, aufbereitet und zu feinen Fasern zerstampft oder zermahlen wurden. Somit war Papier bereits zu Beginn seiner Entstehung eine Art Recyclingprodukt [10]. Die Qualität des Papiers wurde durch die Qualität der verwendeten Lumpen, sowie die Intensität der Aufbereitung bestimmt [7]. Im Laufe der Zeit wurden Verarbeitungshilfsmittel, Füllstoffe und Veredelungsverfahren entwickelt, sodass sich ein kontinuierlich größerer und diversifizierter werdender Papiermarkt ausbildete. Der um 1450 durch JOHANNES VON GUTENBERG erfundene Buchdruck [11] führte zusätzlich dazu, dass Papier bald zu einem gefragten Material in allen Bevölkerungsschichten wurde.

Da Papier bis zur Mitte des 19. Jahrhunderts lediglich aus Lumpen hergestellt wurde, gab es zwischenzeitlich immer wieder Phasen der Rohstoffknappheit. Trotzdem war die Wiederverwertung alten Papiers lange Zeit nicht in Betracht gezogen worden. Lediglich aus dem Jahr 1366 existiert eine Quelle, in welcher ein Ausfuhrverbot von Altpapier aus der Stadt Venedig beschrieben wird, um die nahe-

gelegene Papiermühle in Treviso mit ausreichend Rohstoff zu versorgen [7], [10].

Die steigende Nachfrage nach Papier machte es somit notwendig weitere Rohstoffquellen zu finden. In Europa wurden zwischenzeitlich (Ende 18. Jahrhundert bis Anfang 20. Jahrhundert) Stroh oder Sägemehl zu Papierherstellung verwendet [6]. Die daraus hergestellten Papiere überzeugten hinsichtlich der Festigkeit und der Optik jedoch nicht. Erst um 1850 konnte durch die Entwicklung des so genannten Holzschliffs ein geeigneter Ersatzstoff gefunden werden. Holzschliff wurde durch das nasse Zerfasern von Holz mit einem Schleifstein gewonnen. Dieses Verfahren wurde in den darauffolgenden Jahrzehnten um verschiedene, meist chemische Aufschlussverfahren erweitert. Dadurch konnten unter anderem gebleichte und feinere Papiere hergestellt werden [9].

Als letzte große Entwicklung im Bereich der Papierrohstoffe sind an dieser Stelle noch der Holzsulfat- bzw. der Holzsulfitzellstoff zu nennen. Beide Stoffe werden über mehrstufige chemische Prozesse erhalten, bei denen aus den Zellen des Holzes hauptsächlich cellulosehaltiger Zellstoff gewonnen wird. Beim Sulfatverfahren werden das Lignin und die Hemicellulose, die neben der Cellulose im Holz vorliegen, alkalisch ($\text{pH} \approx 10$) durch Natriumsulfat gelöst. Im Unterschied dazu arbeitet das Sulfatverfahren im sauren Bereich ($\text{pH} \approx 4$), sodass andere chemische Gruppen angegriffen werden. Bis zum zweiten Weltkrieg war das Sulfatverfahren das bevorzugte Verfahren zur Zellstoffgewinnung, da es günstiger als das Sulfatverfahren war [6]. Durch Weiterentwicklungen in der chemischen Industrie wurde danach das Sulfatverfahren rentabler, sodass heutzutage vermehrt Sulfatzellstoff eingesetzt wird [7]. Eine allgemeine Entwicklung der Zusammensetzung von Papier von 1800 bis 2017 ist in Abbildung 2.3 dargestellt.

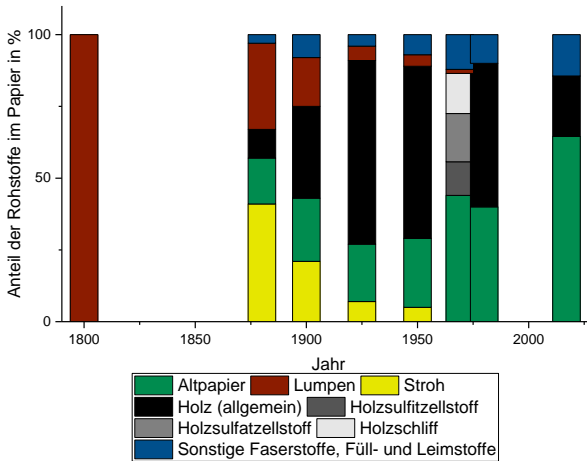


Abbildung 2.3: Durchschnittliche Zusammensetzung von Papier von 1800 bis 2017 [7], [9], [12]

Die beschriebenen Veränderungen im Rohstoffangebot wirkten sich zusammen mit Weiterentwicklungen im Bereich der Papierherstellung stark auf die durchschnittliche Papierzusammensetzung und die Diversität des Papiermarktes aus. Heute sind rund 3000 verschiedene Papiersorten auf dem Markt, die sich vor allem in Hinblick auf Füll- und Klebstoffe sowie weitere Veredelungsmittel wie beispielsweise Druckerfarben unterscheiden [5]. Durch industriell ausgereifte Prozesse zum Papierrecycling kann diese große Vielfalt an Eingangsmaterialien ökonomisch und ökologisch bewältigt werden. Von Vorteil ist dabei, dass für die Erzeugung der ursprünglichen Rohstoffe zur Papierherstellung und das Recycling von Papier ähnliche Prozessschritte verwendet werden, die nachfolgend näher erläutert werden.

2.1.2 Rohstoffaufbereitung und -zerkleinerung

Vor dem Prozess der Papierherstellung muss ein verarbeitbarer Grundstoff erzeugt werden. Zu Beginn der Papierproduktion bestand dieser Schritt im Sammeln und Aufbereiten der Lumpen. Da nicht alle Stoffe für die Produktion verwendet werden konnten – tierische

Fasern eigneten sich nicht zur Papierproduktion – und die Lumpen teils stark verunreinigt waren, war eine händische Sortierung und Reinigung notwendig [7].

Zur Zerkleinerung der Lumpen in ihre Einzelfasern wurden Lumpenstampfwerke oder die so genannten Holländer (siehe Abbildung 2.4) verwendet. Beide Aggregate zerfaserten die Lumpen mechanisch unter Wasserzugabe, wobei die Textilien im Lumpenstampfwerk von mehreren Stampfhämmern zerstampft und im Holländer zwischen zwei Walzen zerschnitten bzw. zerrissen wurden [7].

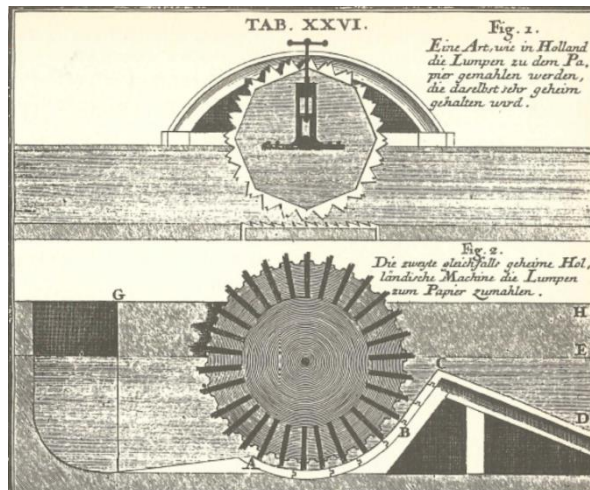


Abbildung 2.4: Erste bildliche Darstellung eines Holländers: Fig. 1: Messerwalze zum groben Zerreißen der Lumpen; Fig. 2: Messerwalze zum Feinmahlen [7]

In der modernen Papierherstellung werden, wie bereits beschrieben, Sulfit- und Sulfatzellstoff eingesetzt, die in chemischen Verfahren aus Holz gewonnen werden. Hinzu kommt Altpapier, welches, ähnlich wie die Lumpen vor mehreren hundert Jahren, gesammelt, gereinigt und zerkleinert werden muss. Heutzutage ist in Deutschland die getrennte Sammlung von Altpapier durch kommunale und private Entsorgungsbetriebe üblich. Somit wird ein vermeintlich reiner Stoffstrom aus Papier erhalten, der lediglich

durch unvollständige Trennung seitens des Verbrauchers kontaminiert werden kann.

In den 1980er Jahren war eine getrennte Sammlung von Altpapier aus Einzelhaushalten noch als „ökologischer Unfug“ beschrieben worden, weil der Aufwand einer getrennten Sammlung den Mehrwert für das Papierrecycling bei Weitem übersteige [10]. Somit wurde vielerorts Altpapier über den Hausmüll entsorgt und danach in entsprechenden Sortieranlagen abgetrennt.

Diese Abtrennung brachte verschiedene Herausforderung mit sich und war Gegenstand der Forschung, mit dem sich um 1980 herum unter anderem JULIUS [13] und FAßNACHT [14] im Rahmen ihrer Dissertationen beschäftigten. Problematisch war dabei, dass vor allem Altpapier und Kunststoffe nicht sortenrein voneinander trennbar waren [13]. FAßNACHT [14] entwickelte daher mehrere Verfahrensvarianten, die als ersten Verfahrensschritt die Zerkleinerung des Hausmülls vorsahen. Danach folgten je nach Variante unterschiedliche Klassieraggregate.

So geartete trockene, mechanische Aufbereitungsverfahren wurden zügig von der Industrie übernommen und gelten 1983 in der Arbeit von JULIUS [13] bereits als Stand der Technik. Als Weiterentwicklung diskutiert er verschiedene Verfahren, die eine Sortierung nach unterschiedlichen Materialeigenschaften (siehe Tabelle 2.1) vorsehen. Seine weiteren Untersuchungen konzentrierten sich hauptsächlich auf die trockene, „selektive Zerkleinerung und Klassierung“ bzw. die „Sortierung nach elastischem Verhalten“ und versprachen eine Verbesserung der Trennung von Papier und Kunststoff.

Tabelle 2.1: Von JULIUS vorgeschlagene Sortiervverfahren zur Trennung von Papier und Kunststoffen aus Hausmüll [13]

Zur Trennung herangezogene Materialeigenschaft	Sortiervverfahren	Mögliche oder notwendige Art der Vorbehandlung des Aufgabegutes	Bemerkungen
Reißfestigkeit, Elastizität, Plastizität	Selektive Zerkleinerung und Klassierung, Sortierung nach elastischem Verhalten	Herabsetzung der Papierfestigkeit durch Zugabe von Wasser	Verschiedene Arten der Zerkleinerung möglich, Sieb und Stromklassierung anwendbar, Kunststoffabtrennung mit Haken oder Stacheln
Raumgewicht, Teilchengröße, Teilchenform	Windsichtung	Änderung der Flugfähigkeit durch thermische Schrumpfung oder Zugabe von Wasser	Sortierung in relativ engem Kornbereich, Vorbehandlung des Aufgabegutes notwendig
Erweichungstemperatur	Thermo-adhäsions-sortierung	-	Geringer spezifischer Durchsatz, Erweichungstemperatur für verschiedene Kunststoffarten unterschiedlich
Elektrische Leitfähigkeit	Elektrosortierung	Erhöhung der Leitfähigkeit durch Zugabe von Wasser	Geringer spezifischer Durchsatz, Sortierung in relativ engem Kornbereich, Vorbehandlung des Aufgabegutes notwendig
Lichtreflexion, Absorption, dielektrische Eigenschaften	Automatische Klauerverfahren	-	Einzelkornsortierung, geringer spezifischer Durchsatz, nur für großflächige Bestandteile anwendbar

2.1.3 Recycling von Altpapier - Stofflösung und Abtrennung im wässrigen Medium

Im Regelfall wird das Altpapier durch kommunale Abfallunternehmen gesammelt und der Aufbereitungsanlage der Papierfabrik zugeführt. Die heutzutage stattfindende, gute Trennung des Altpapiers in Privathaushalten hat die von JULIUS [13] erläuterten, vornehmlich trockenen Trennverfahren verdrängt.

Der Prozessablauf im wässrigen Medium, in Abbildung 2.5 dargestellt, ist das am Markt etablierte Verfahren. Leitgedanke bei der vollkontinuierlichen Aufbereitung ist das Abtrennen von Störstoffen, sodass eine qualitätsgesicherte, möglichst homogene Altpapierfaser-Fraktion zur weiteren Verwendung in Papier oder Pappe gewonnen wird.

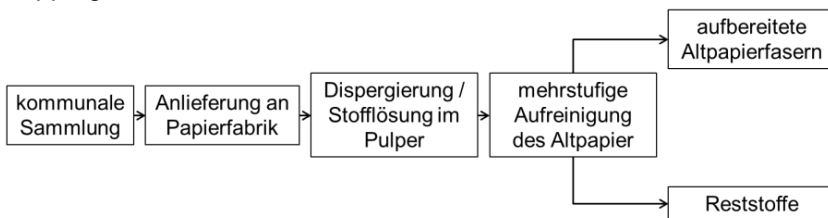


Abbildung 2.5: Schematischer Ablauf des Papierrecyclings

Die Aufbereitung umfasst dabei mehrere Prozessschritte. In Abbildung 2.6 ist ein beispielhafter Aufbau einer Papierrecycling-Anlage und eine exemplarische Abfolge der Aufbereitungsaggregate zu sehen. Je nach Papierfabrik und angestrebter Qualität der aufbereiteten Fasern, kann die Abfolge der Aggregate variieren. Die Funktion der einzelnen Aggregate wird im Folgenden erläutert.

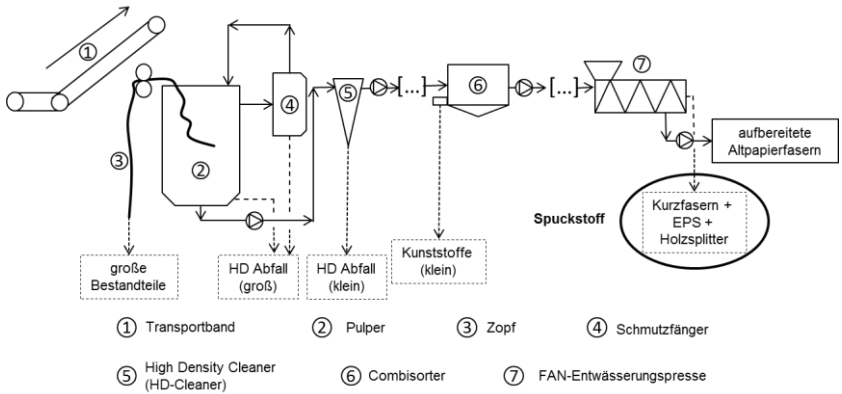


Abbildung 2.6: Fließschema des Papierrecyclings nach [15]

Das meist gebündelte Altpapier gelangt über ein Transportband in den Prozess. Hauptaggregat im Papierrecycling ist der Pulper oder Stofflöser (siehe Abbildung 2.7). In diesem großen Behälter mit Rotor am Boden wird das Altpapier mit Wasser versetzt und so in kleinere Faserbündel oder Einzelfasern dispergiert. Prallkanten innerhalb des Pulpers sorgen für eine weitere Vereinzelung der Faserbündel. Wasserlösliche Bestandteile werden von den Papierfasern gelöst. Große Reststoffe mit hoher Dichte (HD Abfall) sammeln sich am Boden des Pulpers und können dort abgezogen werden.

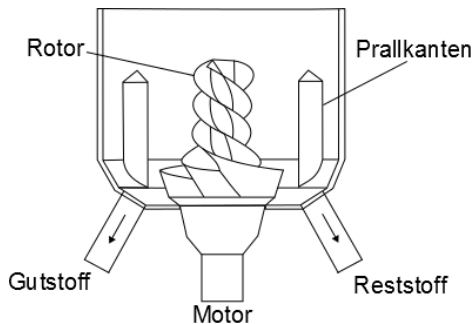


Abbildung 2.7: Querschnitt durch einen Pulper nach [16]

Längliche und flächige Störstoffe wie Folien und Bänder wickeln sich aufgrund der Strömungsverhältnisse im Pulper um den so genannten Zopf. Dieser ist beim Anfahren der Anlage ein in den Pulper gehängtes Seil. Im Laufe des Betriebes besteht der Zopf aus den Störstoffen selbst, welche kontinuierlich aus dem Pulper gezogen werden (siehe Abbildung 2.8).



Abbildung 2.8: Aus dem Pulper entnommener Zopf [17]

Je nach Aufbau der Recyclinganlage und Zielqualität des Recyclingpapiers folgen nach dem Pulper verschiedene weitere Aggregate zur Abtrennung von Fremdstoffen. Typisch sind unter anderem Schmutzfänger und HD-Cleaner (HD: High Density) zum Entfernen von Störstoffen mit hoher Dichte, wie beispielsweise Heftklammern, mineralischen Füllstoffen, Steinen und Glasscherben. Diese Aggregate sind meistens in Zyklonbauweise ausgelegt. Zum Teil wird auch noch ein De-Inking durchgeführt, um Druckfarben von den Fasern zu entfernen und weißes Papier herstellen zu können.

Die in der vorliegenden Arbeit betrachtete Papierfabrik verwendet als Endstufensortierer zur Abtrennung von Kunststoffen und zur weiteren Auflösung von Faserknäulen (Entstippung) einen Combisorter (siehe Abbildung 2.9).

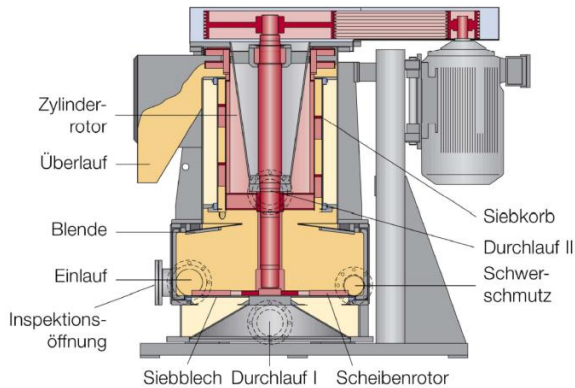


Abbildung 2.9: Aufbau eines Combisorters nach [18]

Der Combisorter besteht im Wesentlichen aus zwei Bereichen: dem unteren Bereich, in dem die Trennung durch einen Scheibenrotor und ein Siebblech realisiert wird, und dem oberen Bereich mit einem rotierenden Siebkorb. Im unteren Bereich wird Schwerschmutz, der in den vorgeschalteten Aggregaten noch nicht abgetrennt wurde, abgeschieden. Durch die Rotation des Scheibenrotors werden Stoffe mit hoher Dichte zum Zylindermantel befördert und dort abgezogen. In diesem Bereich lösen sich außerdem Faserknäule durch Aufprall auf den Rotor und das Siebblech. Bereits vereinzelte Fasern durchdringen das Blech und verlassen das Aggregat durch den Durchlauf I.

Alle weiteren Bestandteile werden durch die Blende in den oberen Bereich gedrückt. Wasser und Papierfasern können den Siebkorb durchdringen und gelangen durch den Durchlauf II zu den weiteren Prozessaggregaten der Papierherstellung. Fremdstoffe wie Kunststoffe werden getrennt über den Überlauf abgeführt.

Prinzipbedingt sollte der Faserverlust durch die Verwendung eines Combisorters gering ausfallen [19]. In der Praxis ist jedoch zu beobachten, dass der Rückstand immer noch Fasern enthält, die nicht vom Kunststoff abgetrennt werden konnten. Um diese Fasern zum Teil noch zurückzugewinnen, folgen weitere Aufbereitungsschritte die von Fabrik zu Fabrik variieren.

Im letzten Prozessschritt wird der Rückstand mechanisch entwässert. In der im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Recyclinganlage geschieht dies durch eine BP-BELTEC Schneckenpresse der FAN SEPERATOR GMBH, im Folgenden FAN-Presse genannt [20]. Eine solche Presse ist in Abbildung 2.10 dargestellt.



Abbildung 2.10: FAN-Presse [20]

Die Presse besteht aus einer sich drehenden Schnecke, die den Spuckstoff vom Einlass zum Auslass transportiert. Im Schneckenmantel befinden sich feine Öffnungen, durch die Wasser und kurze Fasern entweichen können. Der entwässerte Spuckstoff verlässt danach den Prozess. Das faserhaltige Prozesswasser wird dem Prozess wieder zugeführt. Die weiteren Verarbeitungsschritte sind mit der Herstellung von Neuware identisch (siehe Abbildung 2.11).

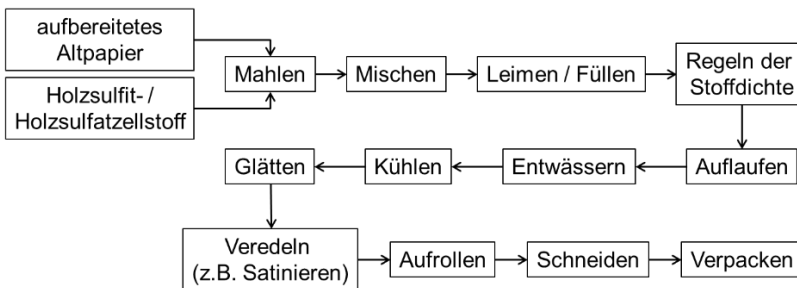


Abbildung 2.11: Vereinfachtes Produktionsflussbild der industriellen Papierproduktion nach [7]

2.2 Kunststoffe und Kunststoffverarbeitung

Ähnlich wie bei Papier, handelt es sich bei Kunststoffen um eine junge Materialklasse. Von wirtschaftlicher Bedeutung sind diese Materialien seit den 1950er Jahren, wobei die Wachstumsraten im Vergleich mit anderen Werkstoffen, wie beispielsweise Aluminium und Stahl, hoch sind (siehe Abbildung 2.12) [21].

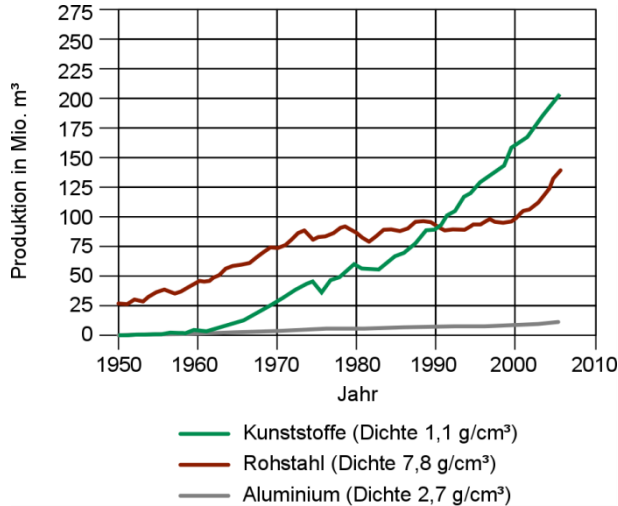


Abbildung 2.12: Weltweites Produktionsvolumen verschiedener Werkstoffe (Kunststoffe inkl. Fasern, Lacke, etc.) nach [21]

Wie der Name dieser Materialklasse impliziert, sind Kunststoffe künstlich synthetisierte Materialien. Ein Großteil der Kunststoffe ist erdölbasiert. Da es sich hierbei um eine endliche Ressource handelt, werden vermehrt Kunststoffe recycelt oder auf Basis nachwachsender Rohstoffe entwickelt. Diese können biologisch abbaubar sein. Zusätzlich zu dieser Unterteilung, können Kunststoffe anhand ihrer Molekülstruktur in Thermoplaste, Elastomere und Duromere gruppiert werden (siehe Abbildung 2.13). Elastomere bestehen aus weitmaschig vernetzten Polymerketten, die durch Lösungsmittel- oder Wärmeeinwirkung nicht mehr voneinander getrennt werden

können. Selbiges gilt für Duomere, wobei die Vernetzung noch engmaschiger ist, wodurch diese wesentlich steifer und spröder sind, als die weich-zähen Elastomere. Auf die Gruppe der Thermoplaste wird im Folgenden genauer eingegangen.

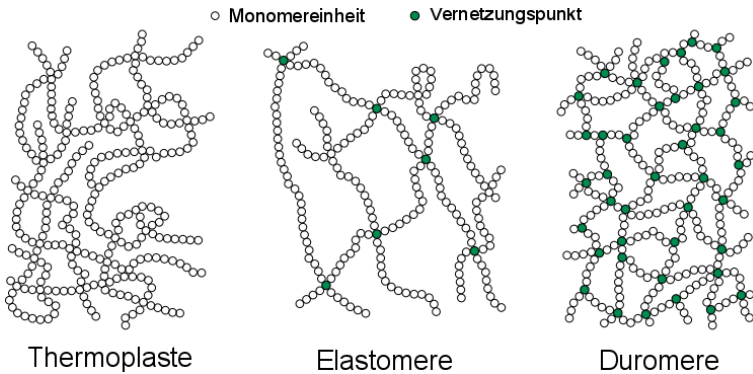


Abbildung 2.13: Schematischer molekularer Aufbau von Thermoplasten, Elastomeren und Duomeren nach [22]

2.2.1 Thermoplastische Kunststoffe

Im Gegensatz zu Elastomeren und Duomeren sind die Molekülketten von Thermoplasten nicht miteinander vernetzt (siehe Abbildung 2.13). Es besteht jedoch die Möglichkeit, dass die linearen Kettenmoleküle Seitenketten ausbilden und somit verzweigte Moleküle entstehen (siehe Abbildung 2.14).

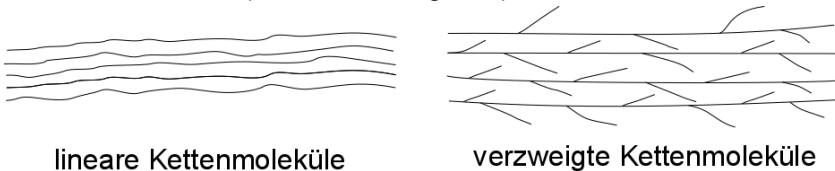


Abbildung 2.14: Aufbau linearer und verzweigter Thermoplaste nach [23]

Ob und wie viele Seitenketten gebildet werden, hängt sowohl von den zur Herstellung eingesetzten Monomeren, als auch von den Prozessparametern während der Polymersynthese ab.

Aufgrund der Kenntnis der Struktur eines Polymers lassen sich viele seiner Eigenschaften erklären. So besitzen beispielsweise verzweigte Thermoplaste eine geringere Dichte als aus denselben Monomeren aufgebaute lineare Kettenmoleküle, da die Verzweigungen sich sterisch behindern. Lineare Thermoplaste neigen eher zur Kristallisation, was wiederum Auswirkungen auf die thermischen, mechanischen und optischen Eigenschaften des Werkstoffs und des daraus hergestellten Bauteils hat.

Die namensgebende Eigenschaft thermoplastischer Kunststoffe ist, dass sie bei erhöhten Temperaturen erweichen und schmelzen. Amorphe Thermoplaste, also Thermoplaste ohne kristalline Strukturen, erweichen bereits bei verhältnismäßig niedrigen Temperaturen (z.B. 85 °C für PVC [21]). Teilkristalline Thermoplaste z.B. PP und PA 6 zeigen sowohl einen Glasübergangspunkt (T_g), als auch einen Schmelzpunkt (T_m). Der Einsatzbereich dieser Kunststoffe liegt je nach Polymer sowohl über, als auch unter T_g , aber immer unterhalb T_m . Dadurch, dass thermoplastische Kunststoffe schmelzbar sind, können sie sowohl im schmelzförmigen Zustand verarbeitet und mit anderen Stoffen vermengt, als auch in gewissem Umfang recycelt werden. Auf die Verstärkung mit Fasern und die Verarbeitung wird in den folgenden Unterkapiteln eingegangen.

2.2.2 Faserverstärkte Kunststoffe

Im Vergleich mit anderen Werkstoffen, wie beispielsweise Metallen, weisen Kunststoffe relativ geringe Festigkeiten und Steifigkeiten auf [21]. Diese Materialkenngrößen können durch Zugabe von Fasern in den Kunststoff deutlich gesteigert werden. Eine solche Faserverstärkung wird in allen drei Kunststoffklassen praktiziert. Bekannte Beispiele für faserverstärkte Kunststoffe sind kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK, carbonfaserverstärkte Kunststoffe), die vorwiegend mit duromeren Kunststoffe hergestellt

werden, Autoreifen, in deren Gummi ein Stahlgewebe eingelegt ist, und die so genannten WPCs (Wood-Plastic-Composites), die aus Holzfasern und thermoplastischem Kunststoff hergestellt werden und beispielsweise als Bodenbelag oder zur Möbelproduktion genutzt werden.

In allen faserverstärkten Kunststoffen (FVK, faserverstärkte Kunststoffe) gibt es eine klare Aufgabenteilung zwischen Fasern und Kunststoffmatrix: Die Fasern besitzen eine weitaus höhere Steifigkeit als die Matrix und leiten die Kräfte in Faserrichtung. Die Matrix umhüllt die Fasern und überträgt die Kräfte an die Fasern. Außerdem schützt sie die Faser vor Umwelteinflüssen und gibt ihr eine dauerhafte Form.

Wie groß die Verstärkungswirkung ist, hängt von verschiedenen Faktoren ab:

- Faserrichtung: Fasern können die Kräfte nur in Faserrichtung ableiten. Ein anisotroper FVK, dessen Fasern alle in eine Richtung verlaufen, kann in diese Richtung Kräfte optimal aufnehmen. Quer zur Faserrichtung liegt keine Verstärkung vor.
- Mechanischen Eigenschaften von Faser und Matrix: Die resultierenden Eigenschaften des Verbundes lassen sich grob über die so genannte Mischungsregel [24] (Formel 2.1, dargestellt am Beispiel des Elastizitätsmoduls E) aus den Eigenschaften der Einzelkomponenten, sowie dem jeweiligen Volumenanteil φ abschätzen, die jedoch die anderen Faktoren nicht einbezieht:

Formel 2.1:
$$E_{\text{ges}} = \varphi_{\text{Faser}} \cdot E_{\text{Faser}} + \varphi_{\text{Matrix}} \cdot E_{\text{Matrix}}$$

- Länge/Durchmesser-Verhältnis der Fasern: Lange, dünne Fasern leiten die Kräfte optimal. Je kürzer und je dicker die Faser wird, desto schlechter ist die relative Kraftübertragung.
- Faser-Matrix-Haftung: Eine Kraftübertragung von Matrix zu Faser ist nur möglich, wenn die beiden Komponenten aneinander haften, d.h. miteinander wechselwirken. Dies ge-

schiebt im besten Fall durch eine kovalente Anbindung, kann jedoch auch durch Nebenvalenzkräfte realisiert werden.

Insbesondere der letzte Punkt ist bei thermoplastischen FVK und vor allem bei naturfaserverstärkten Kunststoffen (NFK) eine Herausforderung. Problematisch ist hierbei die Kombination von unpolaren Matrixsystemen, wie PP und PE mit den polaren, cellulosischen Naturfasern. Eine Lösung hierfür können Haftvermittler darstellen, die kovalent an die Faser anbinden und in ihrer restlichen Struktur dem Matrixkunststoff ähneln. Die Verwendung eines Haftvermittlers bedeutet jedoch auch zusätzliche Kosten. Um bereits im Voraus abschätzen zu können, ob Faser und Matrix kompatibel sind, kann die Polarität der beiden Komponenten herangezogen werden. Diese ist unter anderem mit dem HANSEN-Parameter beschreibbar.

Bei dem HANSEN-Parameter handelt es sich um einen von CHARLES M. HANSEN entwickelten Löslichkeitsparameter, der ursprünglich dazu gedacht war das Trocknungsverhalten von Lacken beschreiben zu können [25]. Zur Bestimmung der Verdampfungsenergie ΔE eines Lösungsmittels wird diese in die Dispersionsenergie ΔE_D , die Energie der Dipol-Dipol-Wechselwirkungen ΔE_P und die Energie der Wasserstoffbrückenbindungen ΔE_H aufgeteilt:

Formel 2.2: $\Delta E = \Delta E_D + \Delta E_P + \Delta E_H$

Wird die Energie auf das molare Volumen V_m normiert, ergibt sich:

Formel 2.3:
$$\frac{\Delta E}{V_m} = \frac{\Delta E_D}{V_m} + \frac{\Delta E_P}{V_m} + \frac{\Delta E_H}{V_m}$$

Diese Terme lassen sich durch den von HANSEN eingeführten Löslichkeitsparameter δ ausdrücken als

Formel 2.4: $\delta^2 = \delta_D^2 + \delta_P^2 + \delta_H^2$

wobei

$$\delta^2 = \frac{\Delta E}{V_m}, \quad \delta_D^2 = \frac{\Delta E_D}{V_m}, \quad \delta_P^2 = \frac{\Delta E_P}{V_m}, \quad \delta_H^2 = \frac{\Delta E_H}{V_m}.$$

Die Löslichkeitsparameter δ_D , δ_P , und δ_H sind für viele gängige Chemikalien literaturbekannt und besitzen die Einheit $\text{MPa}^{0.5}$ [26-34]. Mit diesen drei Größen lässt sich, wie in Abbildung 2.15 dargestellt eine Koordinate im dreidimensionalen Raum beschreiben. Je näher zwei Stoffe A und B in diesem Raum beieinanderliegen, desto besser ist ihre gegenseitige Löslichkeit bzw. Kompatibilität. Zur mathematischen Beschreibung dieser Nähe kann ein Abstand R_a definiert werden, der nach Formel 2.5 berechnet wird:

Formel 2.5:
$$R_a^2 = 4(\delta_{D,A} - \delta_{D,B})^2 + (\delta_{P,A} - \delta_{P,B})^2 + (\delta_{H,A} - \delta_{H,B})^2$$

HANSEN führte zusätzlich einen experimentell zu bestimmenden Radius R_0 ein. Stoffe, die innerhalb dieses Radius R_0 im Koordinatensystem liegen (siehe Abbildung 2.15 Stoff A), sind in dem betrachteten Lösungsmittel löslich.

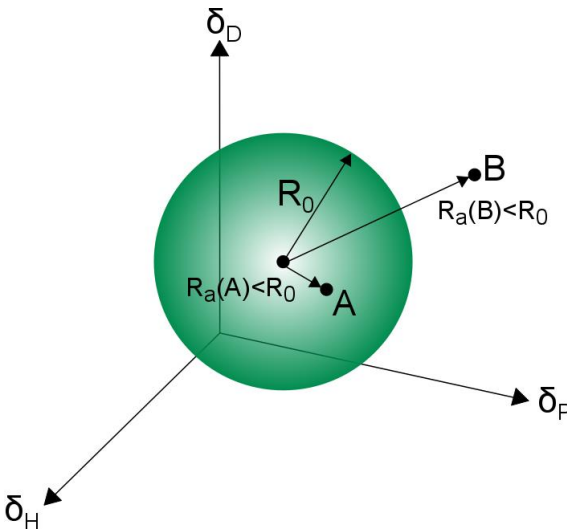


Abbildung 2.15: Darstellung des Hansen-Parameters als Koordinate im dreidimensionalen Raum

Der HANSEN-Parameter wird im Rahmen dieser Arbeit sowohl zur Bewertung der Haftung zwischen dem Spuckstoff und den unterschiedlichen Matrixsystemen verwendet, als auch zur Untersuchung der Reinigung des Spuckstoffs mit verschiedenen Lösungsmitteln in Kapitel 7.1. In beiden Fällen ist wichtig, dass Stoffe, die ähnliche HANSEN-Parameter aufweisen gut ineinander löslich bzw. miteinander kompatibel sind.

2.2.3 Compoundierung und Spritzguss

Die Herstellung von Bauteilen aus faserverstärkten Kunststoffen lässt sich in drei Verfahrensschritte aufteilen (siehe Abbildung 2.16).

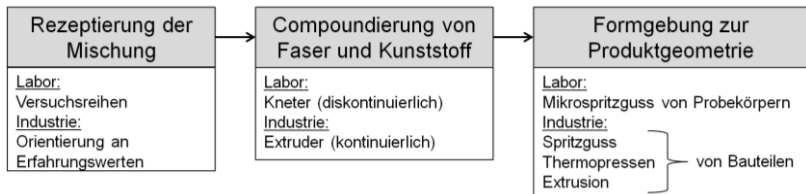


Abbildung 2.16: Prozessablauf zur Herstellung von Bauteilen aus faserverstärktem Kunststoff

Zuerst gilt es die einzusetzenden Rohstoffe und das für die spätere Anwendung richtige Verhältnis zu wählen. In der Forschung werden meist Versuchsreihen mit unterschiedlichen Mischungsverhältnissen betrachtet, da neue Materialkombinationen erprobt werden. Im industriellen Prozess wird sich zusätzlich an Erfahrungswerten und bereits bestehenden Mischungen orientiert. Die erstellten Mischungen werden danach zu Compounds verarbeitet, um einen möglichst homogenen Verbund aus Fasern und Kunststoff zu erhalten. Eine direkte Verarbeitung der nicht compoundierten Faser-Kunststoff-Mischungen in den anschließenden Formgebungsverfahren ist nicht sinnvoll, da hierbei keine ausreichende Durchmischung der beiden Komponenten erfolgt. Ausnahme bildet die Extrusion, wobei hier die spätere Bauteilgeometrie auf Profile und Folien beschränkt ist. Die Compoundierung und die in dieser Arbeit angewandte Formgebung im Spritzgussverfahren sind nachfolgend näher erläutert.

Compoundierung der Faser-Kunststoff-Mischungen

Zur Herstellung faserverstärkter oder gefüllter thermoplastischer Kunststoffe werden verschiedene Mischaggregate eingesetzt. Mit dem Ziel der Einbringung möglichst hoher Scherenergien werden im großtechnischen Maßstab meist gegenläufige Doppelschneckenextruder (siehe Abbildung 2.17) verwendet. Diese bestehen aus zwei Schnecken, die sich wiederum in axialer Richtung aus verschiedenen Schneckenelementen zum Plastifizieren, Mischen und Homogenisieren zusammensetzen. Der gegenläufige Betrieb der beiden Schnecken führt zu hohen Scherkräften zwischen den beiden Schnecken und somit zu einer optimalen Dispergierung der Füllstoffe im Kunststoff. Am Ende des Extruders befindet sich eine Düse, durch die das Compound in Form eines Stranges herausgedrückt wird. Dahinter folgt in der Regel eine Granuliereinheit, die den Strang in kürzere Abschnitte zerschneidet.

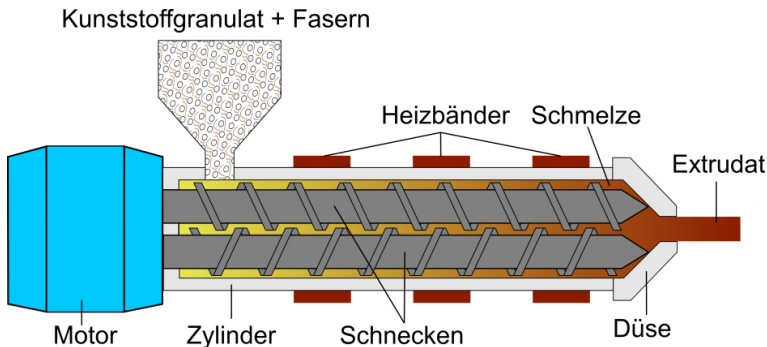


Abbildung 2.17: Schematische Darstellung eines einfachen Doppelschneckenextruders zur Einarbeitung von Fasern in thermoplastische Matrixsysteme (in Anlehnung an [35])

Nachteile der Extrusion – vor allem bei wissenschaftlichen Untersuchungen – ist die zum Teil ungenaue Dosierung der Fasern, sowie die verhältnismäßig große benötigte Materialmenge. Für kleinere und präzisere Mischungen hat sich die Compoundierung im Kneiter durchgesetzt. Im Unterschied zur Extrusion wird hier

diskontinuierlich produziert. Ein Standard-Laborkneter (siehe Abbildung 2.18) besteht aus einer verschließ- und beheizbaren Mischkammer, in der sich zwei gegenläufig rotierende Knet-Rotoren befinden.

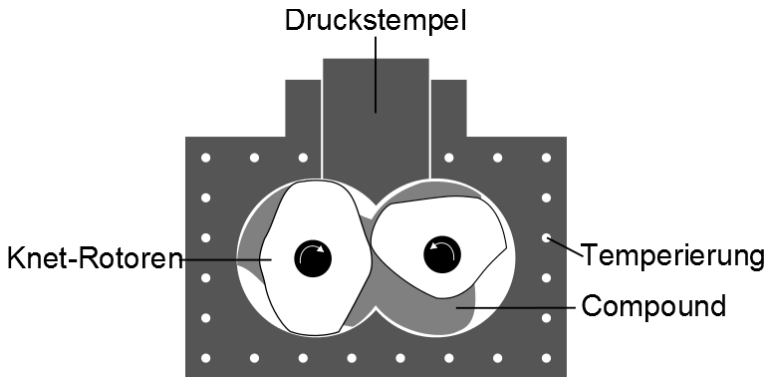


Abbildung 2.18: Schematische Darstellung eines Laborkneters, in Anlehnung an [21]

Im ersten Schritt wird der reine, thermoplastische Kunststoff in die beheizte Kammer gegeben und durch die Temperatureinwirkung und die Scherung zwischen sich drehenden Rotoren und den Wänden der Mischkammer plastifiziert. Danach wird der Füllstoff bzw. das Fasermaterial hinzugefügt. Auch hier bewirkt die Scherung eine Vermischung der beiden Materialien. Anschließend wird die Kammer geöffnet und der neu entstandene Verbundwerkstoff manuell entnommen. Um ein weiterverarbeitbares Granulat zu erhalten, wird das Compound zuletzt beispielsweise in einer Schneidmühle zerkleinert. Somit ist die Verarbeitung im Kneter zwar wesentlich zeitaufwändiger, als die Extrusion, ermöglicht aber die materialsparende Produktion vieler verschiedener, definierter Mischungen für Forschungszwecke.

Formgebung im Spritzgussverfahren

Das Granulat kann im Spritzgussprozess (siehe Abbildung 2.19) zu Bauteilen verarbeitet werden.

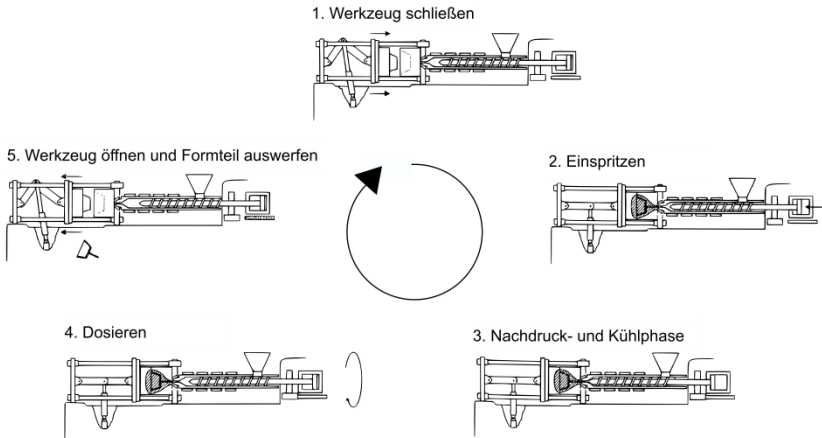


Abbildung 2.19: Spritzgusszyklus in Anlehnung an [36]

Zuerst wird es über einen Trichter eingebracht und durch die Drehung der Schnecke in Richtung der Düse befördert. Zur Dosierung der Einspritzmenge bewegt sich die Schnecke nach hinten, während weiterhin neues Material eingezogen und aufgeschmolzen wird. Ist das Dosiervolumen erreicht, fährt die Spritzeinheit an die Schließeinheit und spritzt den geschmolzenen Kunststoff in das Werkzeug. Dieses kann temperiert werden, um das Fließ- und Erstarrungsverhalten des Kunststoffs im Werkzeug zu beeinflussen und somit auf die Bauteileigenschaften Einfluss zu nehmen. Um die Schwindung des Bauteils zu reduzieren und um Lunker zu vermeiden, folgt auf den Einspritzvorgang die Nachdruckphase, in der weiterhin Material in das Werkzeug gedrückt wird. Anschließend wird die Spritzeinheit zurückgefahren und es beginnt der Dosiervorgang, während das Bauteil abkühlt. Nach einer festen Kühlzeit öffnet sich das Werkzeug und Auswerfer drücken das Bauteil aus der Form. Danach startet der Spritzgusszyklus erneut.

Der Spritzgussprozess eignet sich aufgrund seiner geringen Zykluszeit und des hohen Automatisierungsgrades speziell für die Serienfertigung von Produkten. Hinzu kommt eine sehr gute Reproduzierbarkeit der hergestellten Bauteile, die auch bei der Probekörperfertigung in der Kunststoffentwicklung genutzt wird. Bei gleichbleibenden Prozessparametern werden hiermit Prüfkörper mit identischer thermischer Prozesshistorie erzeugt.

3 Stand der Wissenschaft

3.1 Rückstände aus der Altpapierverwertung – Einsatzmöglichkeiten und Problemstellungen

Über 50% der Rückstände aus der Altpapieraufbereitung werden aktuell direkt in der Papierfabrik oder extern thermisch verwertet [37]. Weitere Entsorgungswege stellen unter anderem die biologische Verwertung sowie die Zement- und Ziegelindustrie dar. Aufgrund des hohen Wassergehaltes, der trotz des Entwässerungsschrittes nicht weiter reduzierbar ist, ist der Heizwert in der thermischen Verwertung gering. Die konkreten Werte unterscheiden sich je nach Produktionsstätte und Zusammensetzung des Eingangsstromes. Exemplarische Werte liefern SOMMER et al. [38] für eine Produktionsanlage in Würth (siehe Tabelle 3.1).

Tabelle 3.1: Exemplarische Werte für den Heizwert, den Wassergehalt und den Aschegehalt verschiedener Rückstände aus der Altpapieraufbereitung nach [38]

	Spuck- stoff	Kunststoff- haltiger Reject	De- Inking- schlamm	Bio- schlamm
Heizwert in kJ/kg	4.200	13.500	3.800	400
Aschegehalt in %	20	6	39	8,5
Wasser- gehalt in %	50	39	35	78

Neben dem thermischen Recycling der Rückstände in Müllverbrennungsanlagen oder Heizkraftwerken sind weitere Verwertungs-

wege bekannt. Einige Beispiele dazu geben unter anderem DORNACK et al. [39] und THÖMING et al. [40] an:

- In der Zement- und Ziegelindustrie können faserhaltige Stoffe als Sekundärbrennstoff eingesetzt werden. Die Aschefraktion, zumeist anorganische Materialien z.B. Calcit oder Kaolin, erzielen hier einen zusätzlichen stofflichen Nutzen. Problematisch sind chlorhaltige Kunststoffe im Spuckstoff, die im Prozess zu Anhaftungen an der Ofenauskleidung führen können. [39]
- Aus den cellulosischen Fasern der Rückstände kann über einen mehrstufigen säurehydrolytischen Prozess Lävulin-säure synthetisiert werden. Diese Chemikalie bietet aufgrund ihrer nicht endständigen Ketogruppe und ihrer Carboxylgruppe vielfältige Reaktionsmöglichkeiten und ist daher eine beliebte Grundchemikalie in der organischen Chemie. [39]
- Anorganische, CaO-haltige Bestandteile der Rückstände können im SCC-Prozess (SCC: synthetic calcium carbonate) der CalciTech Synthetic Minerals Europe Limited mit CO₂ zu künstlich hergestelltem Calciumcarbonat umgesetzt werden. Das Calciumcarbonat kann danach als weißer, mineralischer Füllstoff eingesetzt werden. [39]
- Aus feinen Papierstäuben und Kurzfaserrückständen können Papierschaumplatten hergestellt werden. Dazu wird der Rückstand mit Wasser, einem Bindemittel und weiteren Funktionszuschlagsstoffen (Flammschutzmittel, Treibmittel, etc.) vermischt und zu Platten weiterverarbeitet. Diese Einsatzmöglichkeit wurde bisher nur im Labormaßstab evaluiert und bedarf der Hochskallierung in den industriellen Maßstab [40].

Die vorgeschlagenen Einsatzmöglichkeiten sind prinzipiell zwar alle großtechnisch umsetzbar, unterliegen aber auch klaren Einschränkungen, was die Zusammensetzung und den Aufbereitungszustand des Ausgangsmaterials angeht. Vor allem Verunreinigungen mit ver-

schiedenen, unter anderem halogenhaltigen Kunststoffen, müssen vermieden werden.

Der in der vorliegenden Arbeit behandelte Spuckstoff enthält neben Kurzfasern und Holzsplittern auch Polystyrol und in geringen Mengen von unter einem Gewichtsprozent weitere Komponenten, wie nicht genauer definierte Kunststoffpartikel. Ein Einsatz in den drei von DORNACK et al. [39] vorgeschlagenen Verwertungsrouten ist daher nicht ohne weitere Aufbereitungsschritte möglich. Daher wurde für die nachfolgenden Untersuchungen ein Verfahren gewählt, dass eine Verarbeitung des Spuckstoffes mit so wenigen Nachbehandlungsschritten wie möglich bietet. Der Spuckstoff wird dabei lediglich getrocknet, ggf. zerkleinert und danach in eine thermoplastische Kunststoffmatrix eingearbeitet, sodass ein beispielsweise im Spritzguss verarbeitbares Compound erhalten wird. Alle nicht aufschmelzenden Komponenten dienen dabei als Füllstoff oder im besten Fall als Verstärkung des Materials. Schmelz- und komprimierbare Bestandteile, wie das Polystyrol und einige weitere Kunststoffe werden in der Matrix verteilt. In wie weit die einzelnen Komponenten sich positiv oder negativ auf den Verbundwerkstoff auswirken, wird in Kapitel 7.1 diskutiert. Ähnliche Lösungsansätze werden bereits für andere, meist jedoch reinere Stoffströme verfolgt.

3.2 Einsatz von Papier als Füllstoff und Verstärkung in Kunststoffen

Die Überlegung Papier und Kunststoffe zu kombinieren ist grundsätzlich nicht neu. Erste Arbeiten stammen von HON und SEAN [41] aus 1991 und beschäftigen sich mit dem Einsatz von cellulosischen Fasern aus altem Zeitungspapier als Füllstoff und Verstärkung für Polystyrol. Auch SANADI et al. [42], BAROULAKI et al. [43], HUDA et al. [44], [45], MALDAS und KOKTA [46], REN und HON [47] und MYERS [48] behandelten in Ihren Arbeiten diese spezielle Art der Fasern in Verbindung mit thermoplastischen Kunststoffen.

Der Großteil dieser Arbeiten beschäftigt sich mit Stoffströmen aus den USA, wo Zeitungen häufig getrennt von anderen Abfallströmen gesammelt werden. So wird ein qualitativ gleichmäßiger, da sortenreiner Eingangsstrom erhalten. Aus diesem lassen sich Fasern mit definierten Eigenschaften gewinnen.

Zum Zeitpunkt der Erstellung der vorliegenden Arbeit ist kein industrieller Einsatz der aus diesen Fasern hergestellten Verbundwerkstoffe bekannt. Ein Grund hierfür könnte die notwendige Vereinzelung der Fasern sein, die von den unterschiedlichen Forschungsgruppen mit verschiedenen Methoden erzielt wurde. BAROULAKI et al. [43] lösten das Polymer in einer Xylol-Lösung und schieden es so direkt auf die Fasern ab. Die Desagglomeration bei dieser Methode war jedoch unzureichend. Daraus gaben sich Inhomogenitäten (siehe Abbildung 3.1), die die mechanischen Eigenschaften verringerten. Dem Aufbereitungszustand der zu verwendenden Fasern ist daher eine besondere Bedeutung zuzurechnen.



Abbildung 3.1: Von BAROULAKI et al. hergestellter Probekörper aus Zeitungspapier und HDPE [43]

Ebenfalls mit Fasern aus recyceltem Zeitungspapier, jedoch im Verbund mit einem duromeren Matrixsystem (Phenol-Epoxidharzgemisch) beschäftigten sich YADAV et al. [49]. Aufgrund der von den Autoren vorgeschlagenen Einsatzszenarien z.B. als Balkenkonstruktion für den Hausbau oder in nichttragenden Komponenten, wie Fenstern und Türen, lag der Fokus dieser Materi-

alcharakterisierung auf dem mechanischen Verhalten und dem Wasseraufnahmeverhalten der Verbunde. Die ermittelten Eigenschaften wurden mit Ergebnissen von SANADI et al. [42], [50] verglichen, bei denen PP als Matrix zum Einsatz kam. Die Verbunde mit dem duromeren System erreichten bei identischem Faseranteil vergleichbare mechanische Eigenschaften, zeigten jedoch eine höhere Wasseraufnahme.

Ähnliche Untersuchungen mit Epoxidharz als Matrix und neuem Papier als Faserverstärkung führten Nubbo et al. durch [51-54]. Die verwendeten Papiere wurden dabei aus unterschiedlichen Pulpen und mit verschiedenen Qualitäten hergestellt. So konnte die Abhängigkeit der Eigenschaften der Verbundwerkstoffe von den Papiereigenschaften (z.B. Flächengewicht) bestimmt und modelliert werden. Basierend auf den Untersuchungen schlugen die Forscher außerdem verschiedene Anwendungsfälle, wie beispielsweise im Sportbereich (Fahrrad, Snowboards, etc.), im Bausektor, als Leiterplatten und in der Automobilindustrie vor, jedoch ohne genauere Evaluation dieser Szenarien.

Auch Ohsawa et al. [55] untersuchten einen Verbund aus neuem Papier und einer Kunststoffmatrix. Sie verwendeten jedoch kein „westliches“ Papier („Yoo-shi“), welches aus relativ kurzen Fasern besteht, sondern Washi-Papier, das aus langen Fasern der japanischen Papiermaulbeere hergestellt wird. Die Autoren wählten Washi-Papier als Verstärkungsmaterial, da es aufgrund der langen Fasern Kräfte gut aufnehmen und ableiten kann und zusätzlich eine geringe Dichte von $0,39 \text{ g/cm}^3$ besitzt. Als Kunststoffmatrix wurde PLA (aus dem Englischen **p**oly**l**actic **a**cid; Polymilchsäuren) verwendet, um einen „grünen“, d.h. biologisch abbaubaren Verbundwerkstoff zu erzielen. Im Vergleich mit dem reinen PLA konnte durch die Verwendung von Washi-Papier-Lagen, die in einem Heißpressvorgang mit dem PLA verbunden wurden, bereits bei einem Faservolumengehalt von 23 % eine Verdopplung des Elastizi-

tätsmoduls und eine Erhöhung der Zugfestigkeit um den Faktor 1,5 erreicht werden.

Parallel zur Erstellung der vorliegenden Arbeit wurden an der Technischen Universität Dresden Versuche zum Einsatz von Reststoffen aus dem Altpapierrecycling (Grobrejekte, Fangstoffe und Deinkingschlämme verschiedener Papierfabriken) zur Herstellung von „Bioverbundstoffen“ [56], [57] durchgeführt. Die Reststoffe wurden papiertechnologisch untersucht und danach mit Kunststoffen compoundingiert. Die Verarbeitung der erhaltenen Granulate erfolgte mittels Spritzguss und Extrusion. Dabei traten jedoch zum Teil Verarbeitungsprobleme auf, die unter anderem durch die Pelletierung der Ausgangsstoffe behoben wurden. So konnte für den gezielten Anwendungsfall der Terrassendiehlenfertigung eine Hochskalierung des Prozesses erfolgen.

Die vorstehende Liste bisheriger Arbeiten zeigt überwiegend, dass bereits diverse Versuche zur Kombination von Papier und Kunststoff durchgeführt wurden. Diese Studien sind der Grundlagenforschung im Bereich Papierfaser-Kunststoff-Mischungen zuzuordnen. Für die industrielle Übertragbarkeit eines Prozesses ist die Verfügbarkeit der Einsatzstoffe zu ökonomisch wettbewerbsfähigen Konditionen maßgeblich. Hieran mangelt es einigen der aufgeführten Papierfasern (z.B. Washi-Fasern), wodurch eine signifikante Verbreitung bislang ausblieb.

Daher wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit aufgeklärt, in wieweit aus einem bislang zu entsorgenden Reststoff ein aus werkstoffkundlicher Sicht attraktiver Einsatzstoff für die Kunststoffbranche erzeugt werden kann. Begleitend hierzu werden ergänzende Stoffbehandlungsschritte erprobt und evaluiert.

Die Möglichkeit Reststoffe aus dem Altpapierrecycling im technischen Maßstab einzusetzen ist bisher nicht ausreichend untersucht. Das Interesse der Papierindustrie, werkstoffliche Recyclingpfade zu etablieren ist groß. Aufgrund der Differenzierung

der Papierindustrie (in Deutschland ca. 180 Werke) [58] ergeben sich Stoffströme, welche sich von einem Werk zum anderen Werk unterscheiden. Eine zentrale Vermarktungsplattform für die Reststoffe der deutschen Papierindustrie besteht nicht. Es werden stets werksspezifische Entsorgungslösungen entwickelt.

Im Rahmen dieser Arbeit wird daher mit *einem* Material *einer* Papierfabrik gearbeitet, wodurch die innere Konsistenz gewährleistet wird. Durch die Betrachtung einer Vielzahl an Materialeigenschaften kann eine ganzheitliche Analyse des Materials sichergestellt werden, die zur Auswahl geeigneter Anwendungsszenarien notwendig ist. Die detaillierte Abgrenzung der vorliegenden Arbeit und der vorgestellten wissenschaftlichen Veröffentlichungen ist in Tabelle 3.2 dargestellt. Unterschiede wurden farblich gelb markiert, Gemeinsamkeiten blau. Bei Gemeinsamkeiten und Unterschieden in einem Tabellenfeld wurde die Farbe Grün gewählt.

Tabelle 3.2: Zusammenfassung des Stands der Wissenschaft

Autoren	Quellen	Ausgangsmaterial		Fokus auf	Besonderheiten	Abgrenzung zur vorliegenden Arbeit
		Füllstoff	Matrix			
Hon und Sean	[41]	Zeitungs- papier	PS	Viskosität, Molekulargewicht	Untersuchung des Molekulargewichts nach Verarbeitung	Ausgangsmaterial, Untersuchungsfokus
Sanadi et al	[42], [50]	Zeitungs- papier	PP	mech. Verhalten, Wasseraufnahme	Einsatz von Haftvermittlern	Ausgangsmaterial, Untersuchungsumfang
Baroulaki et al.	[43]	Zeitungs- papier	LDPE, PP HDPE, PP	Prozessabfolge, Desagglomeration	Überführung der Polymere in Lösung	Ausgangsmaterial, Prozessroute
Huda et al.	[44], [45]	Zeitungs- papier, Glasfasern	PLA, PP	mech. + therm. Verhalten	Vergleich mit GFK	Ausgangsmaterial, Referenz
Maladas und Kokta	[46]	Zeitungs- papier	rPP	mech. Verhalten, Faservereinzelung	recyceltes PP	Ausgangsmaterial, Untersuchungsumfang
Ren und Hon	[47]	Zeitungs- papier, Naturfasern	PP	mech. Verhalten	Vergleich mit NFK.; Haftvermittler	Ausgangsmaterial, Untersuchungsumfang
Myers	[48]	Zeitungs- papier, Holzmehl	PP	mech. Verhalten, MFI	Vergleich mit WPC	Ausgangsmaterial, Untersuchungsumfang
YADAV et al.	[49]	Zeitungs- papier	Phenol-Epoxidharz	mech. Verhalten Wasseraufnahme	Duromere Matrix	Ausgangsmaterial, Art des Matrixsystems
Nubbo et al.	[51-54]	neues Papier	Epoxidharz	Papierqualität, mech. Verhalten, Leichtbau	Duromere Matrix	Ausgangsmaterial, Art des Matrixsystems
Ohsawa et al	[55]	neues Washi-Papier	PLA	mech. Verhalten	längere Fasern	Ausgangsmaterial, Verarbeitungsvorgängen (Heißpressen, Laminataufbau), Faserlänge
TU Dresden (Großmann et al.; Tülich et al.)	[56], [57]	verschiedene Resiststoffe aus dem Altpapier-recycling	PP, HDPE	Verarbeitung, mech. Eigenschaften, Unterschiede der Ausgangsstoffe	Pelleiterung; großer Untersuchungsumfang mit breitem Materialspektrum	unterschiedliche Reststoffe: keine Konzentration auf einen Stoffstrom einer Papierfabrik; papiertechnologische Untersuchungen, geringerer Fokus auf Eigenschaften der Compounds

4 Analytische Methoden

Zur Charakterisierung des Spuckstoffes, sowie der Compounds aus Spuckstoff und Kunststoff bzw. der Referenzmaterialien aus Naturfasern und Kunststoff wurden verschiedene analytische Methoden genutzt, die im Folgenden erläutert werden. Die bestimmten Eigenschaften lassen sich in mechanische, thermische und weitere Eigenschaften unterteilen.

4.1 Mechanische Eigenschaften

Die mechanischen Eigenschaften eines Materials sind entscheidend für seine spätere Anwendung. Im Rahmen dieser Arbeit wurden insbesondere die Eigenschaften der verschiedenen Compounds unter Zug- und Schlagbelastung untersucht, da diese bei den betrachteten Anwendungsfällen relevant sind. Zur Untersuchung dieser Eigenschaften wurden Probekörper des Typs 1 BB für die Zugversuche DIN EN ISO 527-2-1996 [59] sowie des Typs 3 für die Schlagzähigkeitsprüfungen nach und DIN EN ISO 179-2006 [60] verwendet (siehe Abbildung 4.1, Tabelle 4.1 und Tabelle 4.2).

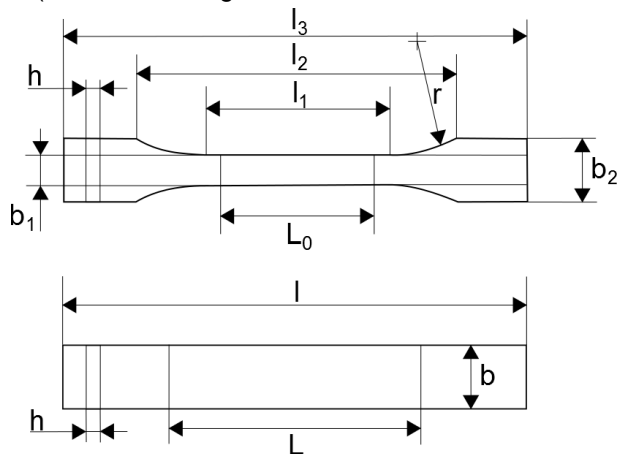


Abbildung 4.1: Probekörperform für Kunststoffe (Zugprüfung oben, Schlagzähigkeit, unten) nach [59] und [60]

Tabelle 4.1: Probekörperabmessungen Typ 1BB im Vergleich mit Typ 1A und 1B; alle Angaben in mm [59]

	Bezeichnung	1BB	1A	1B
l_1	Länge des engen parallelen Teils	$12 \pm 0,5$	80 ± 2	$60 \pm 0,5$
l_2	Entfernung zwischen den breiten parallelen Seiten	23 ± 2	$109, \pm 3,2$	$108 \pm 1,6$
l_3	Gesamtlänge	≥ 30	170	150
L_0	Messlänge	$10 \pm 0,2$	$75 \pm 0,5$	$50 \pm 0,5$
b_1	Breite des engen Teils	$2 \pm 0,2$	$10 \pm 0,2$	$10 \pm 0,2$
b_2	Breite an den Enden	$4 \pm 0,2$	$20 \pm 0,2$	$20 \pm 0,2$
h	Dicke	≥ 2	$4 \pm 0,2$	$4 \pm 0,2$
r	Radius	≥ 12	24 ± 1	$60 \pm 0,5$

Tabelle 4.2: Probekörperabmessungen Typ 3 im Vergleich mit Typ 1 und 2, alle Angaben in mm [60]

	Bezeichnung	3	1	2
l	Länge	11 h oder 13 h	80 ± 2	25 h
b	Breite	10 oder 15	$10 \pm 0,2$	10 oder 15
h	Dicke	3 bzw. Dicke des Formteils	$4 \pm 0,2$	3 bzw. Dicke des Formteils
L	Stützweite	6h oder 8h	$62 \pm 0,5$	20 h

Bei diesen Probekörpertypen handelt es sich um vergleichsweise kleine Probekörper. Diese Probekörpertypen werden vorwiegend für Laboruntersuchungen verwendet, bei denen nur geringe Materialmengen zur Verfügung stehen. Die Vergleichbarkeit der ermittelten Werte innerhalb eines Probenkörpertyps ist gegeben.

4.1.1 Zugversuch

Im Zugversuch werden die mechanischen Eigenschaften eines Materials unter Zugbelastung bestimmt. Für gefüllte, thermo-

plastische Kunststoffe wird der Versuch nach DIN EN ISO 527-4 [61] durchgeführt. Die Zugprüfung wurde bei 23 °C und 50 % r.H. an einer Universalprüfmaschine der Firma ZWICK ROELL durchgeführt. Vor Beginn des Versuches wurden die Proben mit einer Einspannlänge von 22 mm in die Klemmbacken der Prüfmaschine eingespannt. Der statische Elastizitätsmodul wurde, wie in der Norm vorgegeben, mit 1 mm/min im Bereich zwischen 0,05 % und 0,25 % Dehnung bestimmt. Danach wurde die Prüfgeschwindigkeit auf 10 mm/min erhöht. Das Spannungs-Dehnungsdiagramm der Probe wurde vom Programm testXpert II direkt während der Messung aus den Ausgangsprobenmaßen, den Daten der Kraftmessdose und der Makro-Längenänderungsaufnehmer (im Bereich der Messung des Elastizitätsmoduls) bzw. der Traverse berechnet. Beispielhafte Spannungs-Dehnungs-Diagramme für Kunststoffe mit verschiedenen Materialverhalten sind in Abbildung 4.2 dargestellt.

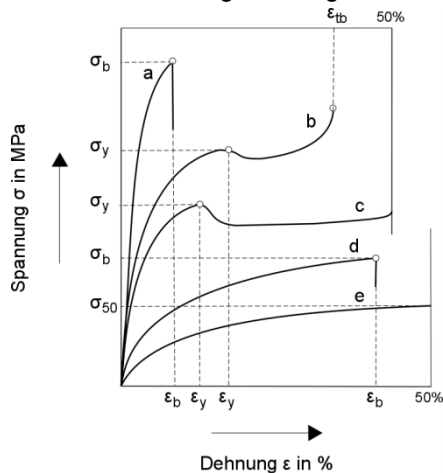


Abbildung 4.2: Beispielhafte Spannungs-Dehnungsdiagramme für Kunststoffe (a: spröder Kunststoff, b: zäher Kunststoff, c: verstreckbarer Kunststoff, d und e: weichgemachter Kunststoff) [21]

Je nach Verhalten der Kunststoffe lassen sich aus den Spannungs-Dehnungskurven verschiedene Kennwerte ablesen. Für Kunststoffe,

die bis zum Bruch einen Anstieg der Spannung über die Dehnung zeigen, werden die Bruchspannung σ_b und die zugehörige Bruchdehnung ε_b bestimmt (siehe Abbildung 4.2, a und d). Einige Kunststoffe weisen allerdings eine Streckspannung σ_y mit der zugehörigen Streckdehnung ε_y auf, ab der sich der Probenquerschnitt durch ein Abgleiten der Polymerketten aneinander verringert, wodurch ein Teil der Spannung bei weiterhin steigender Dehnung abgebaut wird (siehe Abbildung 4.2, b und c). Hierfür wird keine reguläre Bruchdehnung, sondern eine nominelle Bruchdehnung ε_{tb} bestimmt. Bei Probekörpern mit Dehnungen oberhalb von 50 % kann zusätzlich noch die Spannung bei 50 % Dehnung σ_{50} als Kenngröße angegeben werden.

Aus der Steigung der Spannungs-Dehnungskurve wird in der Werkstoffprüfung im Allgemeinen der Elastizitätsmodul E als Quotient aus Spannung und Dehnung und somit als Steigung der Kurve berechnet. Bei Kunststoffen ist dabei eine Besonderheit zu beachten: Es existiert kein linearer Bereich der Kurven, sodass ersatzweise die Steigung der Kurve zwischen 0,05 % und 0,25 % verwendet wird.

4.1.2 Schlagbiegeversuch nach CHARPY

Die CHARPY-Schlagbiegeversuche wurden nach DIN EN ISO 179-2006 [60] an ungekerbten Proben des Typs 1BB mit einer Stützweite von 20 mm durchgeführt. Das allgemeine Prinzip des Versuches ist in Abbildung 4.3 dargestellt.

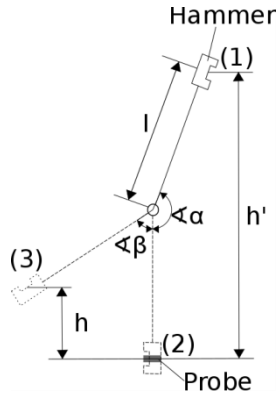


Abbildung 4.3: Prinzipdarstellung des Schlagbiegeversuchs nach CHARPY (nach [62])

Ein Pendelhammer mit der Hammerlänge l befindet sich zu Beginn der Prüfung (1) in einer Höhe h' relativ zu der sich darunter befinden Probe. Durch Auslösen des Hammers fällt dieser und rotiert dabei um einen Winkel α bis er die Probe trifft und zerschlägt (2). Dabei wird ein Teil der kinetischen Energie des Hammers zur Zerstörung der Probe aufgewendet, sodass dieser nur noch um einen Winkel β und bis zu einer Höhe h durchschwingt (3). Das verwendete Pendelschlagwerk 5113 der Firma ZWICK berechnet aus diesen Größen, der an das Gewicht des Hammers gekoppelten Energie (in diesem Fall 1 J), den Reibungsverlusten des Pendelwerks, sowie der Probengröße automatisch die CHARPY-Schlagzähigkeit in kJ/m^2 .

4.2 Thermische Eigenschaften

Die thermischen Eigenschaften eines Materials sind einerseits für die Anwendung, andererseits für die Verarbeitung entscheidend. Vor allem in der Kunststoffverarbeitung und bei der Herstellung von Compounds ist es essentiell zu wissen, wie sich die eingesetzten Komponenten bei erhöhten Temperaturen verhalten. Das Schmelzverhalten wurde im Rahmen dieser Arbeit mittels Dynamischer Differenzkalorimetrie (DSC), Rheometermessungen

und der Herstellung von Fließspiralen im Spritzguss untersucht. Um die maximalen Verarbeitungstemperaturen der einzelnen Komponenten zu identifizieren wurde die Thermogravimetrie genutzt. Als für mögliche Anwendungen interessante Größe wurde die Wärmeleitfähigkeit der Compounds betrachtet.

4.2.1 Dynamische Differenzkalorimetrie (DSC)

Mit der dynamischen Differenzkalorimetrie (engl. Differential scanning calorimetry, DSC) können unter anderem die Glasübergangstemperaturen (T_g), Schmelz- (T_m) und Kristallisationspunkte (T_k), sowie Schmelz- und Reaktionsenthalpien bestimmt werden. Ein beispielhaftes DSC-Diagramm, welches verschiedene detektierbare Fälle abbildet, die im Normalfall jedoch nicht in dieser Kombination vorkommen, ist in Abbildung 4.4 dargestellt.

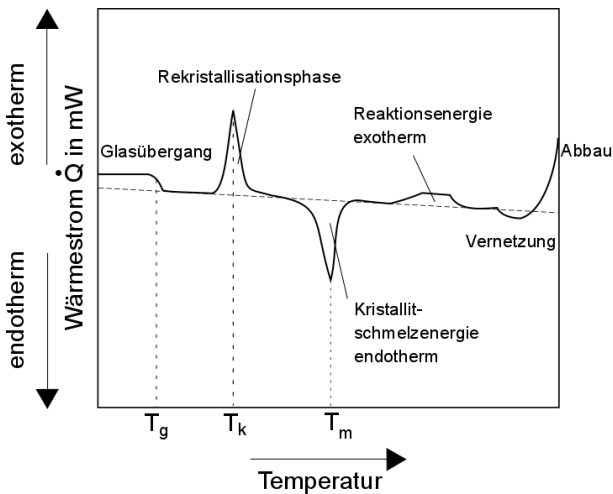


Abbildung 4.4: Beispielhafte DSC-Messkurve mit verschiedenen Phasenübergängen und bestimmbar Temperaturn (nach [23])

Zur Erfassung einer solchen Kurve wird die in einen Aluminiumtiegel gefüllte Probe mit einer Masse von wenigen mg, sowie ein Referenztiegel - leer oder mit Referenzmaterial - bei einer

konstanten Heizrate erwärmt und wieder abgekühlt. Reaktionen oder Phasenübergänge der Probe können durch einen Wärmefluss oder die Temperaturdifferenz zwischen den beiden Tiegeln detektiert werden (siehe Abbildung 4.5).

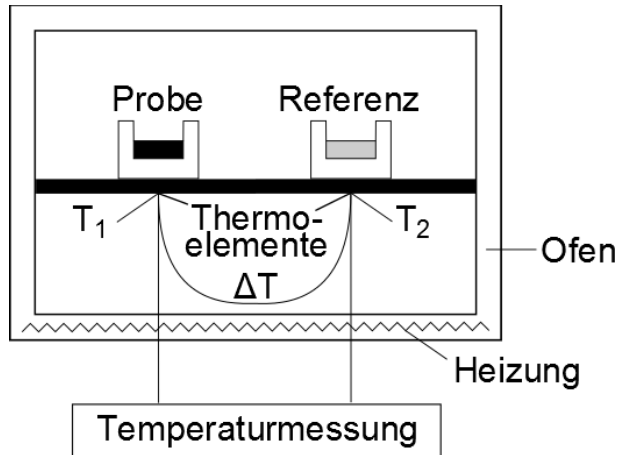


Abbildung 4.5: Prinzipieller Aufbau einer DSC (nach [63])

Für Kunststoffproben werden entsprechend DIN EN ISO 11357-2010 [63] im Regelfall ein Aufheizzyklus, ein daran anschließender Abkühlzyklus und ein weiterer Aufheizzyklus betrachtet. Somit können die Einflüsse thermischer Vorbehandlungen der Probe, die im ersten Aufheizzyklus die Messung beeinflussen, für den zweiten Zyklus ausgeschlossen werden.

Die DSC-Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit wurden mit einer DSC Q2000 der Firma TA INSTRUMENTS nach DIN EN ISO 11357-2010 [63] durchgeführt. Dabei wurden die Proben mit einer Heizrate von 10 K/min von - 90 °C bis 200 °C für PP bzw. bis 350 °C für PA erwärmt, danach mit einer betragsgleich Kühlrate auf - 90 °C abgekühlt und dann wieder auf 200 °C bzw. 350 °C erwärmt. Dieses Temperaturprofil wurde gewählt, um sowohl den Schmelzpunkt aufzuzeichnen, als auch bei der Abkühlung eine vollständige Erstarrung des Materials unterhalb des Glasübergangs zu

gewährleisten. Als Referenzmaterial wurde ein Saphir verwendet, der im Messbereich keine Phasenumwandlung zeigt. Die Auswertung der Messdaten erfolgte im Programm TA Universal Analysis.

4.2.2 Thermogravimetrische Analyse (TGA)

Die Thermogravimetrie dient zur Messung von Gewichtsänderungen einer Probe über Zeit und Temperatur. Diese Änderungen können durch Verdampfung flüchtiger Komponenten und Zersetzung (Gewichtsabnahme), sowie durch Absorption von oder Reaktion mit in der Probenumgebung befindlichen Gasen (Gewichtszunahme) entstehen. Um diese Messungen zu erfassen wird ein Probentiegel so an eine Wägevorrichtung gehängt, dass der Tiegel sich in einem Ofenraum befindet (siehe Abbildung 4.6). Die Auslenkung der Waage wird kompensiert, sodass der Tiegel über die gesamte Messdauer auf derselben Höhe gehalten wird. Die zur Kompensation der Auslenkung benötigte Kraft kann mit dem Gewicht der Probe korreliert werden.

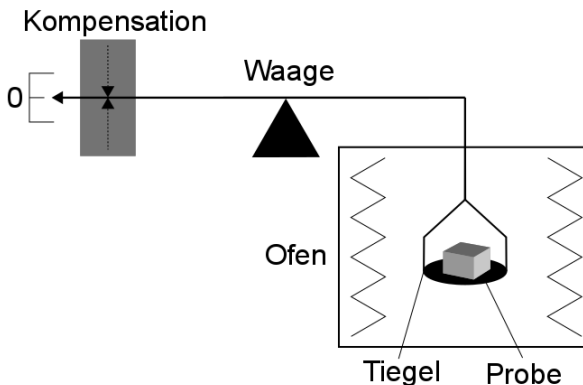


Abbildung 4.6: Schematische Darstellung einer TGA (nach [64])

Es gibt verschiedene Wege die durch eine TGA-Messung erhaltenen Daten aufzutragen und auszuwerten. Wird die Messung mit einer konstanten Heizrate durchgeführt, zeigt eine Auftragung der Masse

über die Zeit oder die Temperatur einen identischen Kurvenverlauf (siehe Abbildung 4.7).

Bei einer sogenannten „High-Resolution“-Messung wird die Heizrate dynamisch angepasst. Solange sich das Gewicht der Probe nicht ändert, wird mit einer hohen Heizrate gemessen. Sobald jedoch eine Veränderung der Probe verzeichnet wird, wird die Heizrate gesenkt. Mit dieser Technik können die Temperaturen der stattfindenden Phasenumwandlungen und Reaktionen genauer bestimmt werden. In diesem Fall bietet sich für eine sinnvolle Auswertung lediglich die Auftragung der Masse über die Temperatur an.

Zur Bestimmung der charakteristischen Temperaturen wird die TGA-Kurve abgeleitet, sodass die Gewichtsänderung über die Temperatur bzw. die Zeit aufgetragen wird (siehe Abbildung 5.7, blaue Kurve). Die Maxima dieser Kurven entsprechen dem Wendepunkt der TGA-Kurve, sind relativ einfach zu bestimmen und werden häufig zum Vergleich verschiedener Materialien herangezogen [64]. Alternativ können die Anfangs- (A), End- (B) und Mittenpunkte (C) der Zersetzungsstufe (siehe Abbildung 5.7, grüne Beschriftung) bestimmt werden. Diese sind jedoch vor allem bei Messungen mit mehreren sich überlappenden Zersetzungen nicht trivial zu bestimmen, sodass in dieser Arbeit auf die Wendepunktmethode zurückgegriffen wurde.

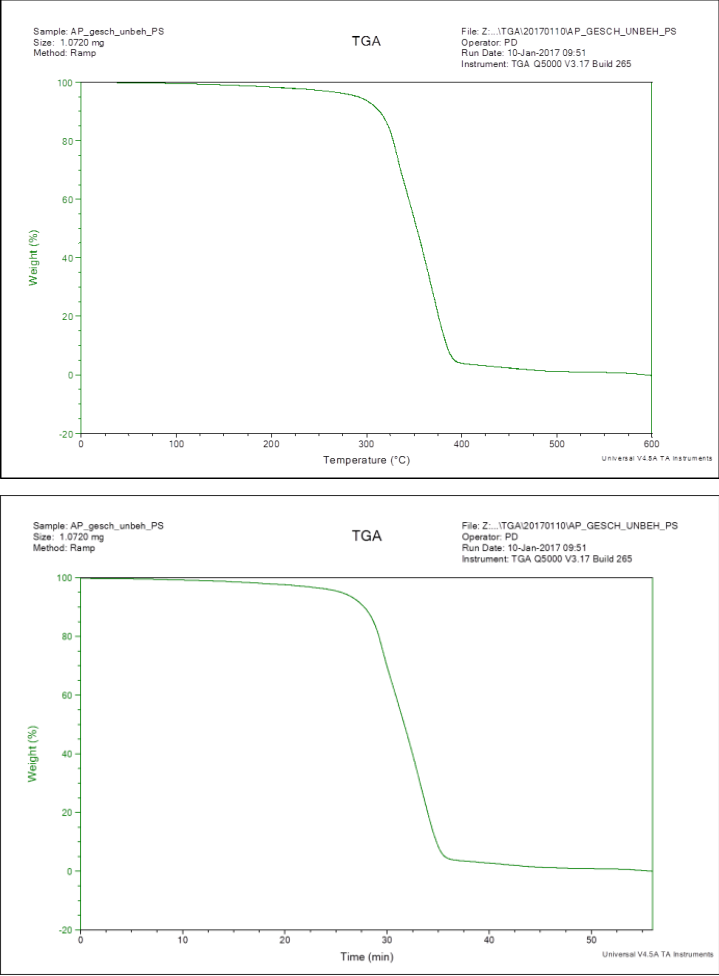


Abbildung 4.7: TGA-Kurven für Polystyrol (oben: Masse gegen Temperatur, unten: Masse gegen Zeit)

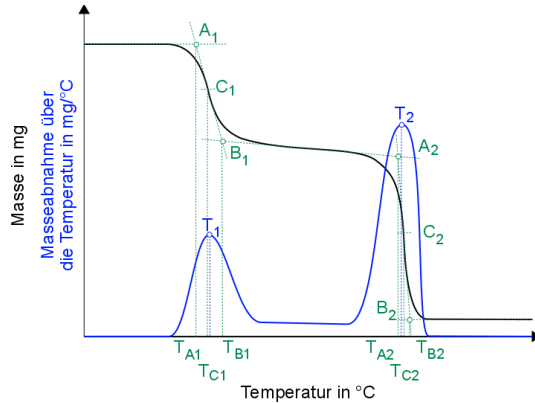


Abbildung 4.8: Möglichkeiten der Auswertung einer TGA-Kurve.
 Blau: Auswertung über Wendepunkt.
 Grün: Auswertung von Anfangs-, End- und
 Mittelpunkt. (in Anlehnung an [64])

Generell gilt aufgrund der Messgenauigkeit der Methode und der vielen Einflussfaktoren, wie beispielsweise dem Auftrieb des Tiegels und der Schwankungen der Ofentemperatur, dass die kennzeichnenden Temperaturen lediglich auf 1 °C genau angegeben werden sollten [64].

Für die Messungen wurde eine TGA Q5000 IR von TA INSTRUMENTS verwendet. Alle Messungen wurden nach DIN EN ISO 11358-2014 [65] als normale (Heizrate 10 K/min) und als „High-Resolution“-Messung von Raumtemperatur bis 800 °C unter Luft als Spülgas durchgeführt. Die Auswertung der Messdaten wurde mit dem Programm TA Universal Analysis vorgenommen.

4.2.3 Wärmeleitfähigkeitsmessung

Die Messung der Wärmeleitfähigkeit werden mit einer TCA200 – LT/A in Anlehnung an DIN CEN/TS 1159-4-2004 [66] durchgeführt. Die zuvor spritzgegossenen, plattenförmigen Probekörper mit 5 cm Durchmesser und ca. 3 mm Dicke liegen dabei zwischen zwei unterschiedlich temperierten Platten (siehe Abbildung 4.9). Zur optimalen thermischen Ankopplung der Proben an die Platten

werden diese mit einer Wärmeleitpaste bestrichen. Die Messungen der Wärmeleitfähigkeit wurden bei 50 °C und 100 °C durchgeführt. Während der Messung werden die elektrische Leistung des Heizelements der unteren Platte und die Temperaturdifferenz (ΔT) zwischen den Platten aufgenommen. Aus der Heizleistung wird der Wärmestrom Φ von der wärmeren Platte (T_2) durch die Probe zur kälteren Platte (T_1) ermittelt. Daraus sowie aus der Temperaturdifferenz und der Fläche A und der Dicke d der Probe wird die Wärmeleitfähigkeit λ nach der ebenfalls in Abbildung 4.9 aufgeführten Formel berechnet.

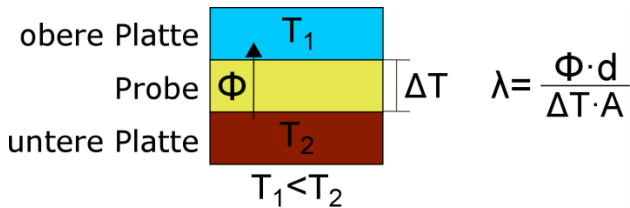


Abbildung 4.9: Schematischer Aufbau zur Messung der Wärmeleitfähigkeit

4.2.4 Bestimmung des Fließverhaltens

Zur Bestimmung des Fließverhaltens bzw. der Viskosität von Kunststoffen werden verschiedene Verfahren eingesetzt. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein AR 2000ex Rotationsrheometer von TA Instruments verwendet. Aus dem compoundierten Material wurden mittels Spritzgussverfahren (siehe Kapitel 2.2.3) runde, plattenförmige Probekörper (1 mm bzw. 2 mm Dicke, 25 mm Durchmesser) hergestellt. Diese wurden in das auf 180 °C aufgeheizte Rheometer eingelegt und in einem Frequenzbereich zwischen 1 und 10^3 1/s (ca. 6,3 rad/s bis 630 rad/s) angeregt. Als Versuchsaufbau wurde ein Platte-Platte-Aufbau verwendet (siehe Abbildung 4.10), da sich die Probekörper leicht im Spritzguss herstellen ließen und eine gleichmäßige Verteilung des Füllstoffs im Probekörper vorliegt. Eine Alternative zu diesem Aufbau wäre eine Kegel-Platte-Anordnung (nach DIN EN ISO 3219, Anhang B [67]) gewesen. Diese erzeugt

zwar eine homogene Scherung im gesamten Scherspalt, führt aber bei gefüllten Proben zu Messfehlern durch ein Austragen des Füllstoffes in den Randbereich.

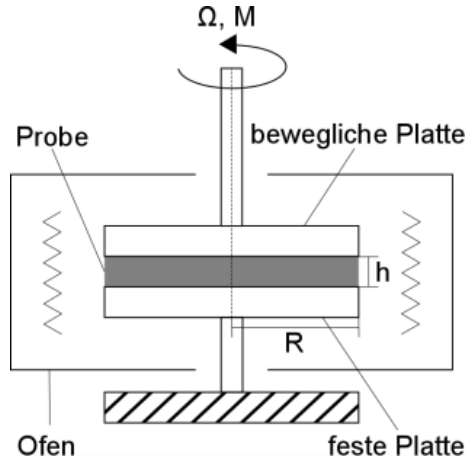


Abbildung 4.10: Prinzipdarstellung eines Platte-Platte-Rheometers (in Anlehnung an [23])

Eine ergänzende Möglichkeit das Fließverhalten einer Thermoplastschmelze insbesondere in Spritzgusswerkzeugen zu bestimmen ist die Herstellung so genannter Fließspiralen.

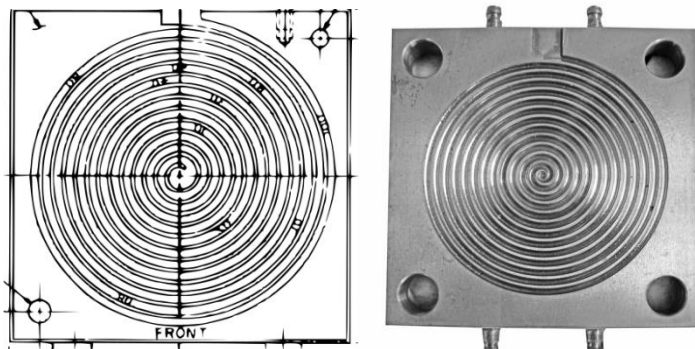


Abbildung 4.11: Werkzeug zur Herstellung von Fließspiralen laut Norm (links) [68] und als Spritzgusswerkzeug (rechts) [69]

Das Verfahren ist angelehnt an die Norm ASTM D 3123 [68]. In der Norm wird ein Werkzeug beschrieben, das in Abbildung 4.11 auf der linken Seite dargestellt ist. Dieses ist am Institut für Polymerwerkstoffe und Kunststofftechnik als Spritzgusswerkzeug ausgelegt worden (Abbildung 4.11, rechts) und wurde in Verbindung mit einer Spritzgussmaschine 220S 150-60 der Firma ARBURG zur Herstellung von Fließspiralen verwendet. Der Anspritzpunkt befindet sich dabei in der Mitte des Werkzeugs. Die Fließlänge der hergestellten Spiralen kann mit einer Schablone vermessen und mit der Viskosität des Materials korreliert werden.

4.3 Sonstige Eigenschaften

4.3.1 Wasseraufnahmeverhalten

Zur Bestimmung der Wasseraufnahme von Kunststoffen sind nach DIN EN ISO 62-2008 [70] mehrere Verfahren zulässig. Um schnell einen Vergleich der Wasseraufnahme der unterschiedlichen Compounds zu ermöglichen, wurde ein Messablauf in Anlehnung an das Verfahren 2 „Bestimmung der Wasseraufnahme nach dem Eintauchen in siedendes Wasser“ gewählt.

Vor der Messung werden die Proben bis zur Massekonstanz bei 80 °C getrocknet. Nach der Nullwägung werden jeweils drei Proben desselben Materials in ein Reagenzglas mit destilliertem Wasser gegeben, welches sich wiederum in einem Becherglas mit siedendem Wasser befindet. In Abweichung zur Norm betrug das Mindestwasservolumen weniger als 300 ml pro Probe, da auch mit geringeren Mengen sichergestellt werden konnte, dass zu jeder Zeit ausreichend Wasser zur Verfügung stand. Die Proben wurden nach 60 min, 90 min, 120 min und 150 min aus dem Wasser entnommen, von Oberflächenwasser befreit und gewogen. Nach typischerweise 150 min war das Wasseraufnahmevermögen ausgeschöpft und es konnte keine weitere Veränderung der Wasseraufnahme mehr verzeichnet werden (siehe Abbildung 4.12).

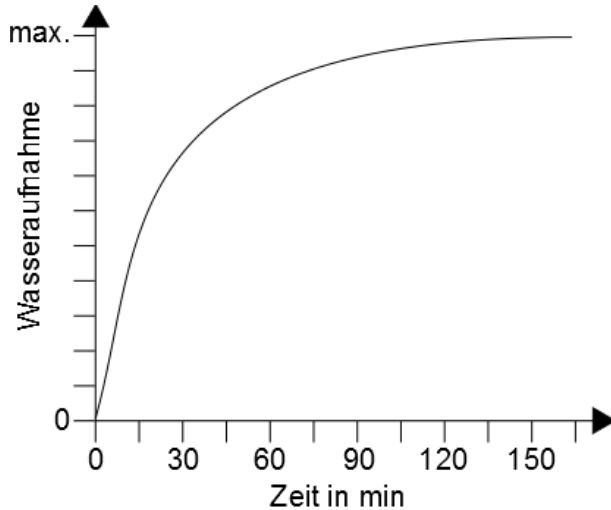


Abbildung 4.12: Prinzipdarstellung der Wasseraufnahme über die Zeit bis hin zur Sättigung (max.)

Der Zeitpunkt, an welchem die Proben in eine „Wassersättigung“ kommen, ist abhängig vom Material und der Probengeometrie. Er würde sich für größere und kompaktere Proben zeitlich verzögern.

4.3.2 Schimmelpilzresistenz

Um die Spuckstoff-Compounds für bestimmte Anwendungen z.B. in feuchter und warmer Umgebung oder im dauerhaften Außeneinsatz zu qualifizieren, wurden Untersuchungen hinsichtlich der Widerstandsfähigkeit in das Messprogramm aufgenommen. Die Prüfung wurde nach DIN EN ISO 846-1997 Verfahren A und Verfahren B [71] von der Entwicklungs- und Prüflabor Holztechnologie GmbH in Dresden durchgeführt. Die Charakteristika dieser beiden Verfahren sind in Tabelle 4.3 dargestellt:

Tabelle 4.3: Prüfverfahren nach DIN EN ISO 846-1997 [71]

Verfahrens- variante	Durchführung	Ergebnis
Verfahren A: Pilz- Wachstums- test	<ul style="list-style-type: none"> - Desinfektion der Proben mit Ethanol-Wasser-Gemisch - Aufbringen der Proben auf kohlenstofffreien Nährboden in Petrischale - Beimpfung mit Sporensuspension - Lagerung im Brutschrank bei 25 °C und ≥ 90 % r.H. - Optische Bewertung des Wachstums nach 7, 14 und 28 Tagen 	Prüfung ob Probe als Nährboden für Schimmelpilze fungiert
Verfahren B: Fungi- statische Wirksamkeit	<ul style="list-style-type: none"> - Identisch zu Verfahren A - Zusätzlich Bereitstellung einer Kohlenstoffquelle in Form von Glukose-Salz-Lösung, die das Wachstum der Pilze fördert 	Prüfung ob Probe fungistatisch (wachstums-hemmend) wirkt

Als Probekörper wurden jeweils runde Probenplatten mit 50 mm Durchmesser und ca. 3 mm Höhe sowie quaderförmige Probekörper mit 30 mm x 10 mm x 3 mm verwendet. Da nur eine optische Beurteilung des Schimmelbewuchses durchgeführt wurde, hat die Probekörperform keinen Einfluss auf die Ergebnisse.

Um die Resistenz gegenüber verschiedenen Pilzarten zu überprüfen, wurden die in Tabelle 4.4 gelisteten Prüfpilze genutzt. Alle Pilze stammen aus der Deutschen Sammlung für Mikroorganismen und Zellkulturen (DSMZ). Die DSMZ-Nummer gibt den Pilzstamm an.

Tabelle 4.4: Verwendete Prüfpilze

Name	DSM-Nummer
Aspergillus niger	1957
Talaromyces funiculosus	1944
Paecilomyces variotii	1961
Trichoderma viride	1963
Chaetomium globosum	1962

Die Bewertung der beimpften Proben nach einer, zwei und vier Wochen erfolgt nach dem in der Norm definierten Probenschema (siehe Tabelle 4.5).

Tabelle 4.5: Bewertungsschema nach DIN EN ISO 846 [71]

Wachstumsintensität	Beurteilung
0	kein Wachstum bei mikroskopischer Betrachtung erkennbar
1	kein Wachstum mit bloßem Auge, aber unter dem Mikroskop klar erkennbar
2	Wachstum mit bloßem Auge erkennbar, bis zu 25 % der Probenoberfläche bewachsen
3	Wachstum mit bloßem Auge erkennbar, bis zu 50 % der Probenoberfläche bewachsen
4	Beträchtliches Wachstum, über 50 % der Probenoberfläche bewachsen
5	Starkes Wachstum, ganze Probenoberfläche bewachsen

4.3.3 Faserlängenbestimmung (μ -CT, QicPic, Mikroskopie)

Zur Bestimmung der Faserdimensionen sind verschiedene Methoden bekannt. Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Mikroskopie, die Mikrocomputertomographie (μ -CT) und die Messung mittels QicPic betrachtet, deren Charakteristika in Tabelle 4.6 dargestellt sind.

Tabelle 4.6: Methoden zur Bestimmung der Faserdimensionen

Methoden	Strahlenart	Probenform	Eignung für Spuckstoff-Compounds
μ -CT	Röntgenstrahlen	Compounds aus Kunststoff und Faser	schlecht
QicPic	Gepulstes Licht	Einzelfasern	schlecht
Mikroskopie	Licht	Einzelfasern und Anschliffe von Compounds	gut

Als zerstörungsfreie Prüfmethode bietet sich die Röntgen-Mikrocomputertomographie (μ -CT) an. Dabei wird ein spritzgegossener Probekörper von verschiedenen Seiten mit Röntgenstrahlen durchstrahlt. Aus den Absorption Bildern erstellt eine Computersoftware ein dreidimensionales Abbild des Probekörpers, bei dem auch innenliegende Strukturen erkennbar sind. Vorversuche im Rahmen dieser Arbeit haben gezeigt, dass das Verfahren für die Kombination der betrachteten Werkstoffe jedoch nicht geeignet ist. Das Hindernis besteht darin, dass die Fasern des Spuckstoffs und die Matrixsysteme eine sehr ähnliche Röntgenabsorption besitzen und somit der Kontrast zur Unterscheidung der einzelnen Materialien zu gering ist. Eine Lösung wäre eine Vorbehandlung der Fasern mit röntgenaktiven Kontrastmitteln gewesen, die allerdings auch einen Einfluss auf die Anbindung der Fasern in

die Matrix gehabt hätten. Deshalb wurde diese Methode nicht weiter betrachtet.

Ein weiteres Verfahren, dass für die Anwendung in dieser Arbeit in Frage kam, war die Faserdimensionsbestimmung mit dem dynamischen Bildanalyse-System QICPIC der SYMPATEC GMBH. Die Hauptkomponenten des QICPIC sind eine gepulste Lichtquelle mit Belichtungszeiten unter einer Nanosekunde und eine hochauflösende Hochgeschwindigkeitskamera, die bis zu 500 Bilder pro Sekunde aufnehmen kann. Die zu messenden Partikel oder Fasern können mit verschiedenen Dispergiersystemen vereinzelt werden und passieren danach den Spalt zwischen Lichtquelle und Kamera. Die Kamera nimmt dabei Bilder aller Partikel auf. Diese werden mit einem Bildanalyseprogramm ausgewertet, sodass beispielsweise der Durchmesser und die Länge der Partikel, sowie eine Verteilung dieser Größen über die Gesamtheit der gemessenen Partikel erhalten werden.

Vorversuche, bei denen die Größenbestimmung der Komponenten des Spuckstoffes erprobt wurde, lieferten leider keine zufriedenstellenden Ergebnisse. Durch die Entwässerung in der FAN-Presse und die Trocknung im Ofen agglomerieren die Papierfasern. Eine vollständige Desagglomeration konnte mit den von der Sympatec GmbH zur Verfügung gestellten Systemen zur Trocken- oder Nassdispergierung nicht erreicht werden.

Da die anderen beiden erprobten Verfahren keine zufriedenstellenden Ergebnisse liefern konnten, wurde sich im Rahmen dieser Arbeit auf die Mikroskopie als eins der gängigsten und günstigsten optischen Untersuchungsverfahren konzentriert. Aufgrund der Flexibilität der Methode lassen sich sowohl Streuproben, als auch Anschliffe von eingebettetem Probenmaterial untersuchen. Zur Analyse des Spuckstoffes wurde dieser direkt auf den Objektträger als Streuprobe aufgebracht. Die Analyse der Compounds erfolgte an in Harz eingebetteten, geschliffenen und polierten Proben. Zur

Mikroskopie wurde ein Lichtmikroskop „Keyence VHX-500F“ verwendet. Das Lichtmikroskop ist mit einem Computer verbunden, auf dem sich eine Software befindet, mit der unter anderem die manuelle Vermessung von Bildausschnitten möglich ist. Dieses Verfahren ist relativ zeitaufwändig, weshalb sich auf die Analyse einzelner Ausschnitte zur Abschätzung der Faserlängen beschränkt wurde

4.3.4 ATR-Infrarotspektroskopie

Bei der Attenuated Total Reflectance Infrarotspektroskopie (ATR-IR) handelt es sich um ein Messverfahren, bei dem die Anregung atomarer Schwingungen zur Identifikation von Atomen oder funktionellen Gruppen innerhalb einer chemischen Verbindung genutzt wird. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde dieses Verfahren genutzt, um den Spuckstoff, sowie an ihm anhaftende Komponenten hinsichtlich der chemischen Zusammensetzung zu charakterisieren. Das Messprinzip der ATR-IR ist in Abbildung 4.13 dargestellt. Im Kristall des ATR-IR-Gerätes werden durch Totalreflexion an den Wänden evaneszente, d.h. hinter der Grenzfläche exponentiell abklingende Wellen erzeugt.

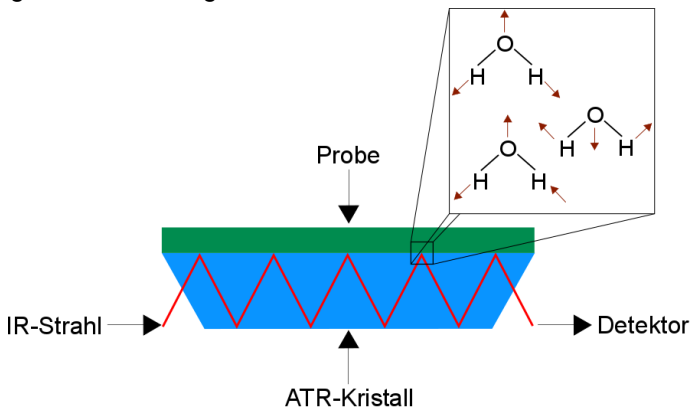


Abbildung 4.13: Schematische Darstellung des Funktionsprinzips eines ATR-IR-Spektrometers (erweitert nach [72])

Atome und Moleküle der Oberfläche der auf dem Kristall befindlichen Probe wechselwirken mit den Wellen, sobald diese eine diskrete Wellenlänge und damit auch diskrete Energien haben. Ein Teil der Wellenenergie wird dabei an die Probe abgegeben. Ein Detektor erfasst den Energieverlust bei bestimmten Wellenlängen und erstellt daraus ein Transmissions- oder Absorptionsspektrum, wie es beispielsweise in Abbildung 4.14 dargestellt ist. Da unterschiedliche Atome und Moleküle bei unterschiedlichen Wellenlängen angeregt werden, kann unter Zuhilfenahme von Literaturwerten auf die Zusammensetzung der Probe zurückgeschlossen werden.

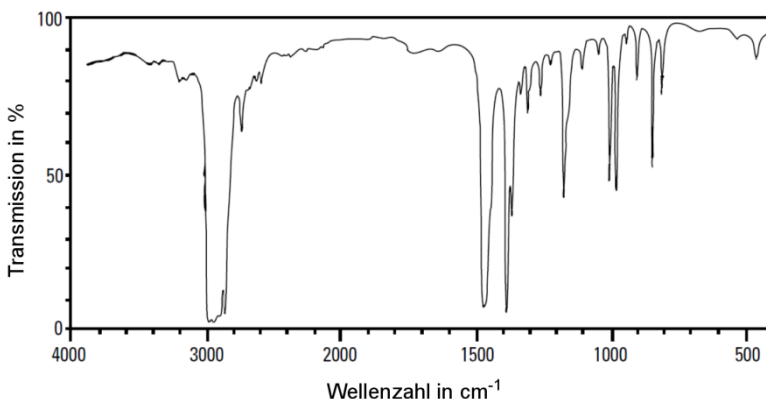


Abbildung 4.14: Beispielhaftes ATR-IR-Transmissionsspektrum für Polypropylen (nach [73])

Für die ATR-IR-Messungen im Rahmen der vorliegenden Dissertation wurde das BRUKER alpha T-IR des Instituts für Organische Chemie der Technischen Universität Clausthal verwendet. Der Messbereich lag zwischen 400 cm⁻¹ und 4000 cm⁻¹.

5 Charakterisierung des Spuckstoffes

Der Spuckstoff, der im Fokus dieser Arbeit steht, wird aus der Aufbereitungsanlage der Smurfit Kappa Herzberg Solid Board GmbH hinter einer FAN-Presse (vgl. Aufbereitung nach Stand der Technik in Kapitel 2.1) erhalten. Bei Verlassen des Prozesses enthält der Spuckstoff noch über 60 w-% Wasser. Durch eine Trocknung bei 80 °C für 24 h kann der Feuchtegehalt auf unter 1 w-% reduziert werden.

Die manuelle Klaubung mehrerer Proben des Spuckstoffes durch LÜER [74] hat folgende Zusammensetzung ergeben:

- ca. 97 w-% Fasern als Hauptkomponente,
- ca. 1 w-% expandiertes Polystyrol (EPS),
- ca. 0,5 w-% Holzsplitter,
- ca. 1 w-% sonstige nicht näher klassifizierbare Reststoffe, wie kleine Steine, Glassplitter, sowie kleine Kunststoffteile

Den Verunreinigungen, die nicht zur Hauptkomponente gehören, ist gemein, dass sie allesamt durch die vorherigen Aufbereitungsaggregate in der Papierfabrik nicht abgetrennt wurden [74]. In Untersuchungen zu Produktionsschwankungen konnte festgestellt werden, dass diese Gewichtsanteile geringfügig schwanken [75]. Für weitere Ausführungen zu Art und Größe der Schwankungen siehe Kapitel 7.1.

Eine Analyse der chemischen Zusammensetzung der Faser wurde im Rahmen eines Forschungspraktikums durch TAS durchgeführt [76]. Mit dem Ziel nur die Fasern zu charakterisieren, wurde der Spuckstoff vor der weiteren Analyse aufbereitet. Die Aufbereitung setzte sich aus einer Zerkleinerung in der Schneidmühle, einer Flotation mit Wasser und anschließender Trocknung, einer erneuten Zerkleinerung und einer Trennung mittels Analysesieben mit 1 mm, 500 µm und 80 µm Maschenweite zusammen. Der beim Sieben erhaltene, feine Faserstoff, der das 80 µm Sieb passiert hat, stellt das Ausgangsmaterial für die chemischen Untersuchungen dar.

Trotz der verschiedenen Aufbereitungsschritte ist auch diese Fraktion immer noch geringfügig mit Fremdstoffen verunreinigt, wie lichtmikroskopische Aufnahmen zeigen (siehe Abbildung 5.1).

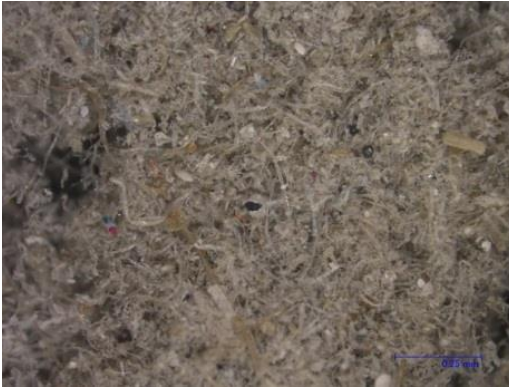


Abbildung 5.1: Lichtmikroskopische Aufnahme des Spuckstoffs nach dem Sieben bei 100-facher Vergrößerung [76].

IR-Spektroskopie

Im ersten Schritt der Analyse wurden an mehreren Einzelproben der Fasern des Spuckstoffes IR-Spektren aufgenommen, die in Abbildung 5.2 dargestellt sind. Zum Vergleich wurde außerdem ein Spektrum einer reinen Cellulosefaser aufgenommen (oberste Linie). In allen Spektren können die breite Bande der OH-Streckschwingung zwischen 3330 cm^{-1} und 3250 cm^{-1} , die CH-Streckschwingung bei ca. 1150 cm^{-1} und die symmetrischen und asymmetrischen CH_2 -Streckschwingungen zwischen 2900 cm^{-1} und 2800 cm^{-1} identifiziert werden. Diese liegen auch in literaturbekannten IR-Spektren von reiner Cellulose [77] und dem Vergleichsspektrum vor. Einige der anderen Banden, wie beispielsweise bei 1750 cm^{-1} treten nur in einigen Spektren auf. Diese Peaks deuten auf Lignin und Hemicellulose hin [76, 78, 79].

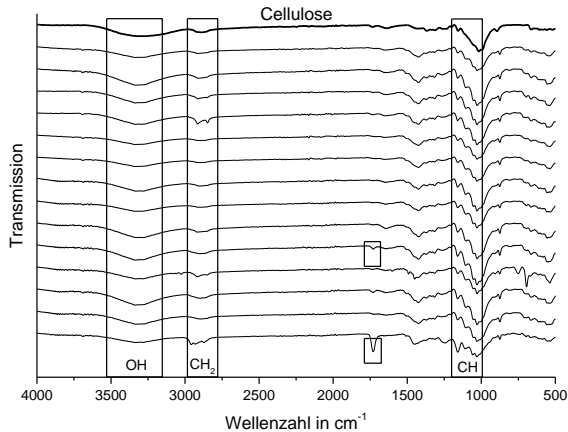


Abbildung 5.2: IR-Spektren mehrerer Faserproben des Spuckstoffes nach [76].

Aus den IR-Spektren lässt sich somit zwar schließen, dass die Faserfraktion des Spuckstoffes hauptsächlich auf Cellulose basiert, eine Aussage über weitere Bestandteile lässt sich jedoch nicht mit vollständiger Gewissheit treffen. Deshalb wurden weitere chemische Nachweise auf Lignin und Hemicellulose durchgeführt.

Quantitative Bestimmung von Lignin

Der Ligningehalt der Faserfraktion des Spuckstoffes wurde mit zwei verschiedenen Verfahren überprüft:

- der Halse-Methode und
- der Delignifizierung mit Monoethanolamin (MEA).

Bei der Halse-Methode werden alle Faserbestandteile außer Lignin mit konzentrierter Salzsäure und konzentrierter Schwefelsäure zersetzt. Das Lignin verbleibt als Feststoff und kann nach einem Waschvorgang mit destilliertem Wasser und einer anschließenden Trocknung gewogen werden. TAS erhielt aus einer Probenmasse von

1 g einen Feststoffanteil von 330 mg, was 33 % Ligningehalt in der Probe entspricht (siehe Tabelle 5.1).

Bei der Delignifizierung wird hingegen das Lignin aus der Faser von Monoethanolamin (MEA) abgebaut. Andere Faserbestandteile werden vom MEA nicht angegriffen. Der Abbau erfolgt durch drei grundlegende Reaktionen:

- Die „Depolymerisierung durch Spaltung von zu α -Carbonylgruppen benachbarten β -Arylethern“,
- die „Demethylierung der aromatischen Methoxygruppen (Etherspaltung)“
- und die „Kondensationsreaktionen z.B. an Hydroxy- oder Carbonylgruppen“ [76].

Wie in Tabelle 5.1 zu erkennen ist, konnte mit den gewählten Reaktionsbedingungen (150 ml Monoethanolamin, 95 °C, 24 h) keine Masseänderung beobachtet werden. Auch die Erhöhung der Reaktionszeit auf 72 h führte nicht zu einer Masseabnahme. Aus diesen Ergebnissen lässt sich schließen, dass die Fasern des Spuckstoffs kein Lignin enthalten.

Tabelle 5.1: Mit der Halse-Methode und der Delignifizierung bestimmte Ligningehalte

Methode	Ausgangsmasse in g	Endmasse in g	Ligningehalt in g	Ligningehalt in %
Halse-Methode	1	0,330	0,330	33
Delignifizierung	1,55	1,55	0	0

Grundsätzlich sollte aus beiden Verfahren derselbe Ligningehalt resultieren. Die erhaltenen Ligningehalte weichen jedoch deutlich

voneinander ab. Bei der Halse-Methode ist es möglich, dass auch andere Bestandteile des Spuckstoffes nicht durch die konzentrierten Säuren angegriffen werden und der Rückstand somit nicht nur aus Lignin besteht. Der reale Ligningehalt kann somit auch deutlich kleiner sein.

Die Delignifizierung mit MEA wurden von TAS zusätzlich mittels TGA und IR-Spektroskopie überprüft. Er konnte im Vergleich der unbehandelten sowie der 24 h und 72 h behandelten Proben keine signifikanten Unterschiede feststellen.

Eine Aussage über den realen Ligninanteil im Spuckstoff ließ sich somit nicht sicher treffen. Aufgrund der aus Kapitel 2.1 bekannten Verfahren zur Papierherstellung und dem daraus folgenden Wissen über die Zusammensetzung von Neupapier, wird ein einstelliger prozentualer Anteil (1 – 10 %) an Lignin in der Faser abgeschätzt. Ausnahme bilden hierbei die im Spuckstoff vorliegenden Holzsplitter, die jedoch nicht einzeln untersucht wurden.

Quantitative Bestimmung von Hemicellulose

Hemicellulose lässt sich ebenso wie Lignin gezielt abbauen. Dafür wurde das Enzym endo-1,4- β -Xylanase (im Folgenden Xylanase) verwendet. Die Reaktion erfolgte bei 40 °C für 24 h in einer wässrigen Lösung aus Natriumcitrat, Salzsäure und Xylanase. Zur Deaktivierung der Xylanase wurde die Lösung für eine halbe Stunde auf 80 °C erhitzt. Die verbleibenden Faserbestandteile konnten abfiltriert und bei 100 °C für 24 h getrocknet werden. Durch Wägung ergab sich ein Gewichtsverlust von 25 w-%.

Aus diesen durch TAS durgeführten quantitativen Bestimmungen, weiteren qualitativen Nachweisen, IR-Spektren und TGA-Messungen, ließ sich eine Faserzusammensetzung von 25 w-% Hemicellulose, 1 - 10 w-% Lignin und >65 w-% Cellulose ermitteln. Es konnte außerdem gezeigt werden, dass trotz der vorherigen Aufbereitung weiterhin Fremdstoffe in den Proben vorlagen, die die Analysen verfälschten. Hinzu kamen Fette, Wachse und weitere Additive, die sich auf der Faseroberfläche abgelagert haben und

über unterschiedliche Lösungsmittel entfernt werden konnten. Auf diese selektive, chemische Reinigung wird jedoch näher in Kapitel 7.1.2.1 eingegangen.

Thermogravimetrie

Zur weiteren Charakterisierung des Spuckstoffes und der Identifizierung möglicher Verarbeitungsbereiche wurden TGA-Messungen durchgeführt (siehe Abbildung 5.3).

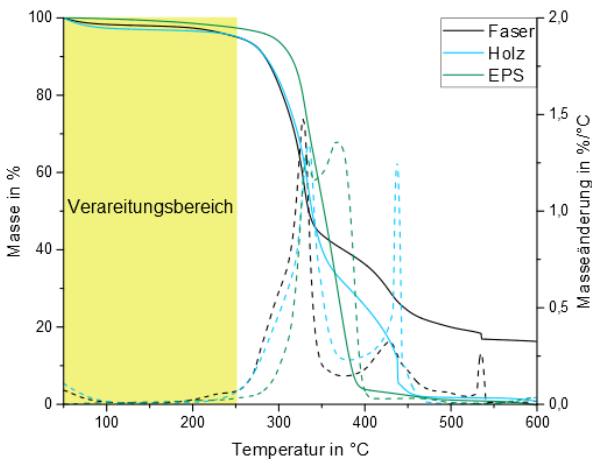


Abbildung 5.3: TGA-Kurven und abgeleitete TGA-Kurven der Bestandteile des Spuckstoffes

Deutlich zu erkennen sind drei aufeinanderfolgende Zersetzungsstufen der Faser mit einem Maximum der Masseänderung bei 329 °C, 429 °C und 535 °C. Die Holzsplitter zersetzen sich aufgrund ihrer ebenfalls lignocellulosischen Struktur bei ähnlichen Temperaturen, wie die Faser. Das expandierte Polystyrol weist einen breiten Zersetzungsspeak von 318 °C bis 388 °C auf, bei dem es sich nahezu vollständig zersetzt.

Alle drei Hauptkomponenten des Spuckstoffes sind somit bis ca. 250 °C thermisch stabil und können bis zu dieser Temperatur größtenteils ohne Zersetzung verarbeitet werden. Eine Identifizierung der einzelnen Komponenten und der Zusammensetzung

des Spuckstoffes aus den TGA-Kurven ist nicht möglich, da die Zersetzungsstufen sich überlappen.

Analyse der Faserdimensionen

Für die Eigenschaften der Compounds und die Sicherheit beim Umgang mit dem Spuckstoff sind die Faserdimensionen entscheidend. Daher wurden stichprobenartig Bilder des Spuckstoffes mittels Lichtmikroskop aufgenommen (siehe Abbildung 5.4). Es ist zu sehen, dass ein Großteil der Fasern über 1 mm lang und ca. 10 µm breit ist. Die Fasern sind somit nicht lungengängig und weisen ein Länge-Durchmesser-Verhältnis von 100:1 auf. Auf den Aufnahmen ist außerdem zu erkennen, dass ein Teil der Fasern in Bündeln vorliegt, die für eine optimale Verstärkung während der Compoundierung aufgetrennt werden müssen.



Abbildung 5.4: Lichtmikroskopische Aufnahmen des Spuckstoffes bei 200-facher Vergrößerung

6 Evaluation der Compounds

Das folgende Kapitel stellt die Bestrebung vor, aus dem zuvor vorgestellten Spuckstoff und verschiedenen, zum Teil recycelten Kunststoffen, faserverstärkte Compounds zu entwickeln. Ergänzend wurden mehrere naturfaserverstärkte Kunststoffe zu Vergleichszwecken charakterisiert. Das Kapitel gliedert sich in folgende Abschnitte:

- Kombination von Spuckstoff und neuem Kunststoff
- Kombination von Spuckstoff und Recyclingkunststoff
- Referenzmaterialien

An dieser Stelle gilt es vor allem die Compounds hinsichtlich ihrer Eigenschaften zu charakterisieren und Abhängigkeiten von Füllstoffgehalt und eingesetzten Materialien zu betrachten. Anhand dieser Eigenschaften werden praxismgerechte Anwendungen bestimmt und diese mit den Material- und Verarbeitungskosten verknüpft. Vergleiche der Spuckstoff-Compounds mit den Referenzmaterialien finden an dieser Stelle explizit noch nicht statt. Nach der materialwissenschaftlichen Betrachtung wird in Kapitel 8 der Fokus hierauf gelegt.

6.1 Kombination von Spuckstoff und neuem Kunststoff

6.1.1 Ausgangsmaterialien

Die Ausgangsmaterialien für die Untersuchungen in diese Kapitel sind der in Kapitel 5 vorgestellte Spuckstoff, sowie zwei Matrixsysteme aus nicht recycelten, d.h. fabrikneuem, thermoplastischen Kunststoffen. Als Matrixsysteme wurden ein Polypropylen und ein Polyamid verwendet. Die Eigenschaften dieser Systeme werden im Folgenden einzeln dargestellt:

Polypropylen H734-52RNA:

Das PP H734-52RNA ist ein Polypropylen Homopolymer der Firma Dow CHEMICAL (mittlerweile durch die brasilianische BRASKEM S.A. vertrieben), welches besonders für dünnwandige Spritzgussteile empfohlen wird. Weitere Materialdaten sind in Tabelle 6.1 dargestellt.

Tabelle 6.1: Materialdatenblatt H734-52RNA nach [80]

Kenngröße	Geprüft nach	Wert
Dichte	ISO 1183	0,900 g/cm ³
MFR	ISO 1133	52 g/10 min
Zugfestigkeit	ISO 527-2	37 MPa
Zugdehnung	ISO 527-2	9 %
Biege-Elastizitätsmodul	ISO 178	1600 MPa
CHARPY-Schlagzähigkeit (gekerbt)	ISO 179	2,5 kJ/m ²
Wärmeformbeständigkeit	ISO 75-2	105 °C
VICAT-Erweichungstemperatur	ISO 306	152 °C

Polyamid Schulamid 6 HV 15:

Bei dem „Schulamid® 6 HV 15“ (im folgenden PA) handelt es sich um ein für den Spritzgussprozess geeignetes, ungefülltes Polyamid 6 der A. SCHULMAN GMBH. Das Material wurde ausgewählt, da es auch kommerziell als Matrixsystem für faserverstärkte Kunststoffe, zum Beispiel als glasfaserverstärkte Variante „Schulamid® 6 GF HV 15“ verwendet wird. Ein Materialdatenblatt mit Spezifikationen des Herstellers lag nicht vor, die selbst ermittelten Werte sind Kapitel 6.1.3 zu entnehmen.

6.1.2 Verarbeitung

Der betrachtete Spuckstoff wurde vorentwässert aus der Papierfabrik abgeholt und spätestens eine Woche nach Verlassen der Aufbereitungsanlage 24 Stunden lang bei 80 °C in einem Trockenschrank der BINDER GMBH getrocknet. Für eine schnelle und gleichmäßige Trocknung, wurde der Spuckstoff flächig auf Bleche aufgebracht und mindestens einmal während der Trockenzeit manuell durchmischt.

Der ofentrockene Spuckstoff wurde bis zur weiteren Verarbeitung in luftdicht verschlossenen Kunststoffbeuteln gelagert und vor erneuter Feuchtigkeitsaufnahme geschützt. Bei den in diesem Kapitel betrachteten Versuchsreihen wurde das getrocknete Material, welches sich während des Trocknens zu größeren Faseragglomeraten zusammengeschlossen hat, in einer Schneidmühle S15/20 der Firma DREHER zerkleinert.

Der getrocknete und zerkleinerte Spuckstoff sowie das als Matrix fungierende Polymergranulat wurden danach entsprechend der Mischungsverhältnisse in Tabelle 6.2 abgewogen und in einem Laborknetter Poly Lab OS mit der Mischeinheit Rheomix OS der Firma THERMO HAAKE verarbeitet.

Tabelle 6.2: Mischungsverhältnisse und zugehörige Einwaagen zur Herstellung der Compounds

Anteil Faser in w-%	Anteil Kunst- stoff in w-%	Einwaage Faser in g	Einwaage Matrix in g
10	90	5	45
20	80	10	40
30	70	15	35
40	60	20	30
50	50	25	25
60	40	30	20

Für das PP wurden Mischungen mit 10 w-% bis 60 w-% Spuckstoffanteil in Schritten von 10 w-% hergestellt. Bei dem PA wurde sich auf 10 w-% bis 50 w-% in 20 w-% Schritten beschränkt, da auch mit dieser Staffelung gute Aussagen getroffen werden konnten. Die Einwaagen hierfür sind identisch zu denen des PP.

Die Compoundierung erfolgte mit einer Mischgeschwindigkeit von 50 rpm. Die Mischtemperaturen waren abhängig vom Matrixsystem und sind in Tabelle 6.3 dargestellt. Zuerst wurde für fünf Minuten die Matrix alleine in der Mischeinheit aufgeschmolzen und plastifiziert. In den nächsten zehn Minuten wurde der Spuckstoff in kleinen Mengen zügig hinzugegeben und in die Matrix eingearbeitet. Danach konnte der Knetter geöffnet und das Material manuell entnommen werden. Die so erhaltenen Compounds wurden anschließend in der Schneidmühle S15/20 von DREHER zu Granulat zerkleinert. Dieses konnte nach erneuter Trocknung im Ofen im Spritzgussverfahren zu Probekörpern verarbeitet werden, die für die in Kapitel 4 vorgestellten Untersuchungen benötigt wurden.

Tabelle 6.3: Zur Compoundierung verwendete Temperaturen

Matrixsystem	Temperatur der Mischeinheit in °C
PP	185
PA	220

Zur Herstellung der Probekörper wurde eine Spritzgussmaschine Allrounder S220 der Firma ARBURG eingesetzt. Die Temperaturprofile waren abhängig vom Matrixsystem und sind in Tabelle 6.4 dargestellt. Bei hohen Füllgraden mussten die Temperaturen z.T. erhöht werden, um die Viskosität des Materials herabzusetzen und somit weiterhin eine vollständige Füllung des Werkzeuges zu garantieren. Vor allem bei Fasermassengehalten oberhalb 50% und hochviskosen Matrixsystemen konnten teilweise trotzdem keine Probekörper produziert werden.

Tabelle 6.4: Für den Spritzgussprozess eingestellte Temperaturprofile

Matrix-system	Tempera- tur Zone 1 (Einzug) in °C	Tempera- tur Zone 2 in °C	Tempera- tur Zone 3 in °C	Tempera- tur Zone 4 (Düse) in °C
PP	180	190	190	200
PA	220	230	230	240

6.1.3 Eigenschaften der Compounds

6.1.3.1 Mechanische Eigenschaften

6.1.3.1.1 Zugeigenschaften

Die ermittelten Daten für den Elastizitätsmodul der PP- und PA-Compounds sind in Abbildung 6.1 dargestellt. Es ist zu sehen, dass der Elastizitätsmodul sowohl für PP als auch für PA mit steigendem Füllstoffanteil ansteigt. Durch die Zugabe von 50 w-% des Spuckstoffes kann für PP eine Steigerung von ca. 76% und für PA beinahe eine Verdreifachung des Elastizitätsmoduls erreicht werden. Der Anstieg des E-Moduls ist bei den Compounds beider Matrixmaterialien nahezu linear (siehe gestrichelte Trendlinie).

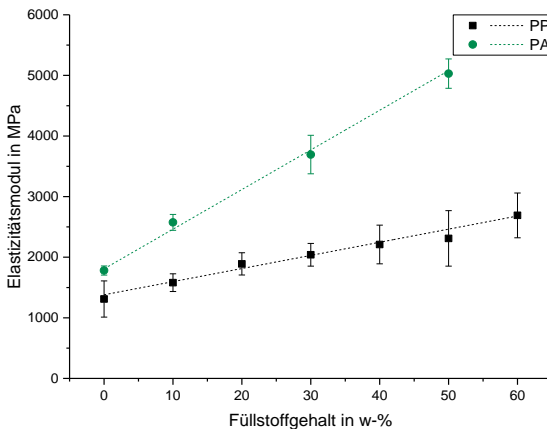


Abbildung 6.1: Elastizitätsmodul der Compounds mit PP und PA in Abhängigkeit vom Füllstoffgehalt

Dieser lineare Anstieg lässt sich mit der in Kapitel 2.2.2 vorgestellten Mischungsregel (Formel 2.1) beschreiben. Durch Gleichsetzen der Mischungsregel und der linearen Geradengleichung mit dem Y-Achsenabschnitt a und der Steigung b , die den Verlauf der Messpunkte beschreibt, kann der theoretische Elastizitätsmodul des Füllstoffes bestimmt werden (siehe Formel 6.1). Dabei kann bei einer Dichte von 1 g/cm^3 , die die Spuckstoff-Compounds ungefähr

besitzen, der Volumenanteil mit dem Gewichtsanteil des Füllstoffs gleichgesetzt werden.

Formel 6.1: $E_{\text{ges}} = \varphi_{\text{Füllstoff}} \cdot E_{\text{Füllstoff}} + \varphi_{\text{Matrix}} \cdot E_{\text{Matrix}}$

$$= \varphi_{\text{Füllstoff}} \cdot E_{\text{Füllstoff}} + (1 - \varphi_{\text{Füllstoff}}) \cdot E_{\text{Matrix}}$$

$$= E_{\text{Matrix}} + (E_{\text{Füllstoff}} - E_{\text{Matrix}}) \cdot \varphi_{\text{Füllstoff}}$$

$$= a + b \cdot \varphi_{\text{Füllstoff}}$$

mit $a = E_{\text{Matrix}}$ und $b = (E_{\text{Füllstoff}} - E_{\text{Matrix}})$

Für die in Abbildung 6.1 dargestellten Ergebnisse ergeben sich zwei Regressionsgeraden deren Achsenabschnitt a und Steigung b , sowie der daraus errechnete Elastizitätsmodul für den Füllstoff in Tabelle 6.1 dargestellt ist. Es ist zu erkennen, dass die berechneten Elastizitätsmoduln für die beiden Matrixsysteme stark voneinander abweichen. Daraus kann geschlossen werden, dass die Verstärkungswirkung des Spuckstoffes in der Polyamidmatrix fast dreimal so stark ist, wie im Polypropylen.

Tabelle 6.5: Achsenabschnitt a , Steigung b und daraus bestimmter E-Modul des Füllstoffes

Matrixsystem	a in MPa	b in MPa	$E_{\text{Füllstoff}}$ in MPa
PP	1380	2167	3547
PA	1808	6541	8349

An dieser Stelle ist darauf hinzuweisen, dass keiner der beiden Werte die realen Elastizitätsmoduln der Fasern im Spuckstoff widerspiegelt. Dafür unterliegt die durchgeführte Rechnung zu vielen idealisierten Annahmen, u.a., dass

- die Fasern im Prüfkörper alle parallel zur Krafrichtung vorliegen,
- der Faservolumengehalt gleich dem Fasermassengehalt ist,
- der Spuckstoff nur aus Fasern einheitlicher Qualität besteht und keine weiteren Bestandteile enthält,
- zwischen Faser und Matrix eine optimale Anbindung vorliegt.

Insbesondere der letzte Punkt erklärt, wieso die berechneten Elastizitätsmoduln so weit voneinander abweichen.

Dies wird auch bei der Betrachtung der Zugfestigkeiten der Compounds in Abbildung 6.2 deutlich. Im Gegensatz zum Elastizitätsmodul zeigen sich hier für die beiden Matrixsysteme unterschiedliche Verläufe (gestrichelt dargestellt):

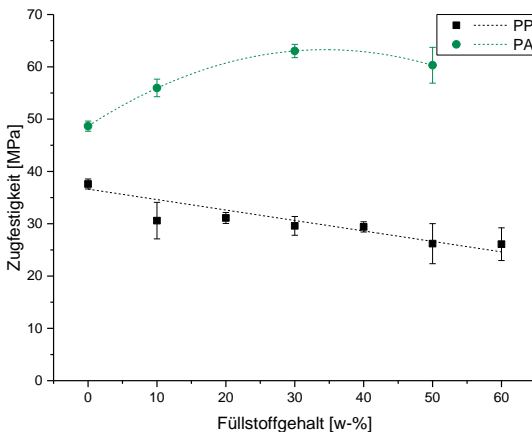


Abbildung 6.2: Zugfestigkeit der Compounds mit PP und PA in Abhängigkeit vom Füllstoffgehalt

Die Zugfestigkeit des ungefüllten PP liegt mit 37,6 MPa im Bereich der Angabe des Materialdatenblatts (37 MPa). Bei den Verbunden mit PP fällt die Zugfestigkeit mit steigendem Füllstoffgehalt ab und verringert sich bis zum Spuckstoffanteil von 60 w-% auf ca. 70 % der Zugfestigkeit des ungefüllten PP.

Die Compounds mit PA zeigen im Bereich geringer Füllgrade einen Anstieg der Zugfestigkeit. Es scheint ein Optimum bei 30 w-% zu geben, da bei der Erhöhung auf 50 w-% Spuckstoff eine geringfügige Verringerung der Zugfestigkeit zu verzeichnen ist.

Die maximale Dehnung der Compounds kann Abbildung 6.3 entnommen werden. Da das ungefüllte PP eine höhere Dehnung besitzt als PA, weisen die Compounds mit PP insgesamt eine bessere Dehnbarkeit auf, als die Compounds mit PA. Dafür wird beim PP bereits durch Zugabe von 10 w-% des Spuckstoffes die maximale Dehnung mehr als halbiert. Für beide Matrixsysteme ist ein Absinken der Dehnung mit steigendem Füllstoffanteil zu verzeichnen. Dies korreliert mit dem Anstieg des Elastizitätsmoduls, der eine Versteifung des Materials signalisiert, wodurch der Widerstand des Materials gegen Verformung ansteigt.

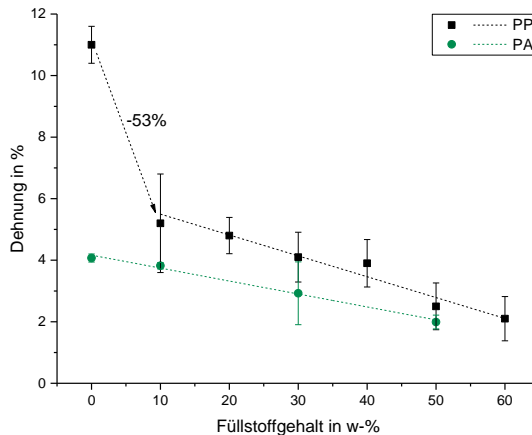


Abbildung 6.3: Maximale Dehnung der Compounds mit PP und PA in Abhängigkeit vom Füllstoffgehalt

Das unterschiedliche Verhalten der beiden Matrixsysteme in Verbindung mit dem Spuckstoff lässt sich vorwiegend mit der Kompatibilität der Papierfasern und dem jeweiligen Polymer erklären. Polypropylen als unpolares Polymer ohne funktionelle Gruppen kann

lediglich van-der-Waals-Bindungen mit anderen Stoffen ausbilden. Polyamid hingegen verfügt über Amidgruppen, die einen polaren Charakter besitzen und somit auch Dipol-Dipol-Wechselwirkungen und Wasserstoffbrückenbindungen mit anderen polaren Gruppen ermöglichen. Die Fasern des Spuckstoffs besitzen aufgrund ihrer lignocellulosischen Struktur ebensolche polaren Gruppen, wie beispielsweise Hydroxylgruppen, und können mit dem Polyamid wechselwirken. Die Wechselwirkung zwischen Polypropylen und den Fasern ist als gering anzusehen.

Die Betrachtung der HANSEN-Parameter von PP, PA und Cellulose (Tabelle 6.6 und Abbildung 6.4) unterstützt diese These. PA liegt in der grafischen Darstellung der HANSEN-Parameter näher an Cellulose als PP und ist somit auch verträglicher mit der Faser.

Tabelle 6.6: HANSEN-Parameter von PP, PA und Cellulose (selbst berechnete Werte kursiv dargestellt)

Stoff	δ_D in MPa ^{0,5}	δ_P in MPa ^{0,5}	δ_H in MPa ^{0,5}	δ in MPa ^{0,5}	Quelle
PP	17,19	-	-	17,19	[81]
	-	-	-	17,49	[82]
	-	-	-	19,2	[83]
	-	-	--	18,8	[84]
	18,0	0	0	18,0	[85]
PA (Nylon 6.6)	18,2	5,1	13,7	23,34	[85]
Cellulose	8,27	8,00	13,88	18,03	[26]

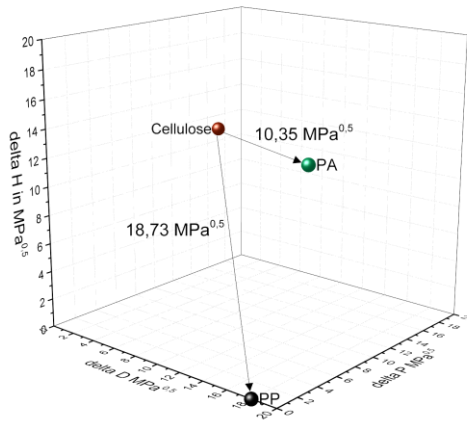


Abbildung 6.4: Grafische Darstellung der HANSEN-Parameter von PP, PA und Cellulose

6.1.3.1.2 CHARPY-Schlagzähigkeit

Die Charpy-Schlagzähigkeiten der Compounds aus Spuckstoff und PP bzw. PA sind in Abbildung 6.5 dargestellt.

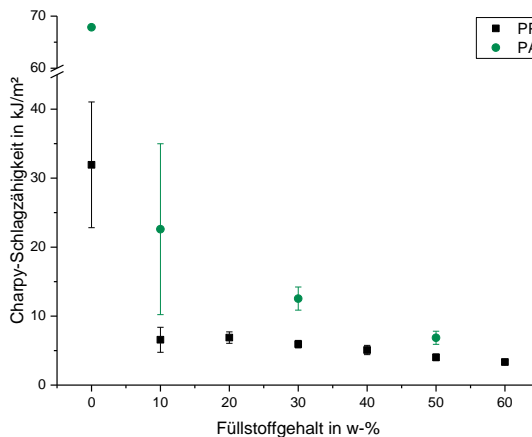


Abbildung 6.5: CHARPY-Schlagzähigkeit der Compounds mit PP und PA in Abhängigkeit vom Füllstoffgehalt

Im Vergleich mit den ungefüllten Matrixsystemen ist die Schlagzähigkeit der gefüllten Compounds wesentlich geringer. Bereits die Zugabe von 10 w-% des Spuckstoffes führt zu einer Abnahme auf ca. 33 % (PA) bzw. 20 % (PP) des Ausgangswertes. Bei den PP-Compounds führt eine weitere Erhöhung des Füllstoffanteils nur noch zu einer geringen Abnahme der Schlagzähigkeit. Für das PA ist von 10 w-% bis 50 w-% Füllstoff noch ein deutlicher Abfall der Schlagzähigkeit zu erkennen. Insgesamt ergibt sich für beide Matrixsysteme mit 50 w-% Spuckstoff eine Reduzierung auf ca. 10% der Zähigkeit des reinen Matrixsystems.

Aus diesem Verlauf kann geschlussfolgert werden, dass die Zugabe des Spuckstoffes die Schlagzähigkeit der Compounds deutlich reduziert. Das PP reagiert bei geringen Spuckstoffanteilen mit einem drastischen Abfall der Schlagzähigkeit. Die Matrix haftet kaum an den Fasern und wird durch die eingebrachte Schlagenergie von diesen getrennt. Durch die Delaminationen kann keine Kraft mehr von der Matrix an die Faser abgeleitet werden, sodass die Probe bricht. Bereits geringe Faseranteile wirken als Fremdkörper in der Probe und begünstigen so den Bruch. Dieses Verhalten deckt sich mit den Erkenntnissen aus dem Zugversuch.

Beim PA liegt eine bessere Faser-Matrix-Haftung vor, sodass mehr Schlagenergie absorbiert wird. Trotzdem begünstigen die Fasern den Bruch der Probe bei schlagartiger Belastung, sodass die Schlagzähigkeit mit steigendem Füllstoffgehalt sinkt.

6.1.3.2 Thermische Eigenschaften

6.1.3.2.1 Schmelz- und Kristallisationsverhalten

In Abbildung 6.6 ist eine typische DSC-Messkurve für die PP-Spuckstoff-Compounds dargestellt. Bei der DSC-Messung wurden zwei Aufheiz- und ein Abkühlschritt aufgenommen, sodass sich die beiden Aufheizkurven überlagern. Aus der DSC-Kurve ergeben sich für die weitere Auswertung zwei Materialkennwerte: Die Schmelztemperatur T_m und –enthalpie H_m . Beide werden aus dem Maximum bzw. der Fläche des Peaks des zweiten Aufheizenschrittes bestimmt.

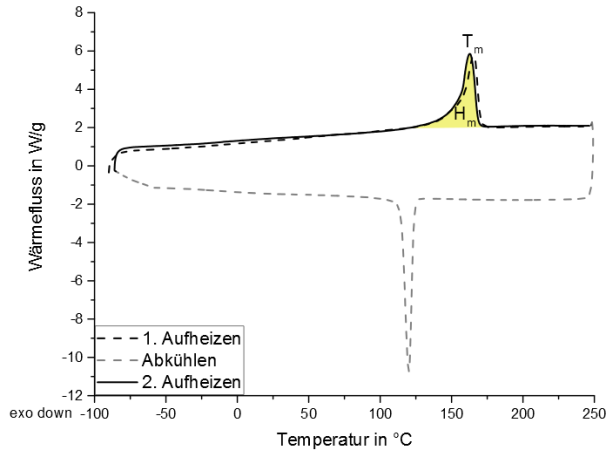


Abbildung 6.6: DSC-Kurve des Compounds mit 80 w-% PP und 20 w-% Füllstoff

Die aus den Messkurven bestimmten Schmelztemperaturen und Schmelzenthalpien sind in Abbildung 6.7 und Abbildung 6.8 dargestellt.

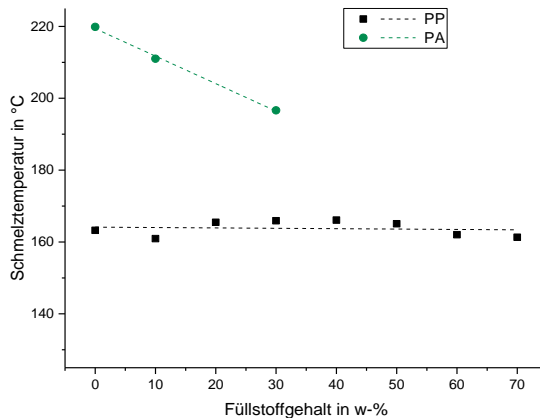


Abbildung 6.7: Schmelztemperaturen der Compounds mit PP bzw. PA

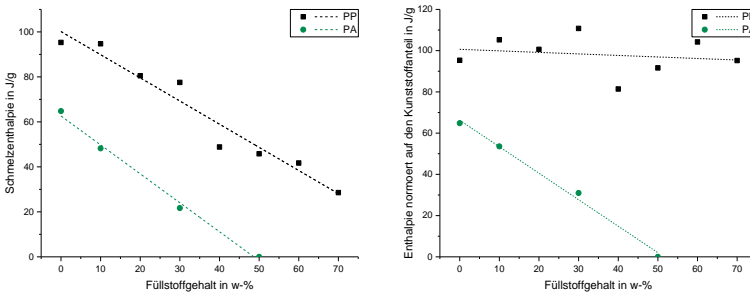


Abbildung 6.8: Schmelzenthalpien (links) und normierte Schmelzenthalpien (rechts) der Compounds mit PP bzw. PA

Beim PP ist klar zu erkennen, dass die Schmelztemperatur fast konstant bleibt und die Schmelzenthalpie mit steigendem Füllstoffgehalt linear abnimmt. Die Schmelzenthalpie nimmt ab, da der Füllstoff amorph ist und nicht schmilzt. Somit reduziert sich bei Zugabe von Füllstoff der schmelzbare Anteil in der Probe. Die Normierung der Enthalpie auf den Kunststoffgehalt zeigt, dass keine erhöhte Kristallisation des PP an den Fasern auftritt.

Die Schmelztemperaturen des PA zeigen einen deutlichen Abfall von 220 °C auf unter 200 °C. Bei 50 w-% Füllstoffanteil konnte in der DSC-Kurve kein Schmelzpeak mehr identifiziert werden. Entsprechend nehmen auch die Schmelzenthalpien überproportional stark ab.

In [15] wurde bereits beschrieben, dass die hohe Maximaltemperatur bei der Messung, sowie die möglicherweise durch die Fasern aufgenommene Feuchtigkeit eine hydrolytische Spaltung des Polyamids hervorrufen könnten. Um diese These zu überprüfen wurden für die Polyamid-Compounds weitere DSC-Messungen mit Maximaltemperaturen von 250 °C, 275 °C, 300 °C und 325 °C durchgeführt. Dabei wurden bis zu vier Aufheischritte betrachtet, um das Verhalten bei mehrmaligem Erhitzen zu untersuchen.

Zwei beispielhafte Ergebnisse dieser Messungen sind in Abbildung 6.9 und Abbildung 6.10 dargestellt. Die weiteren Messserien befinden sich im Anhang (Abbildung 12.1 ff.). Die Diagramme zeigen die Schmelztemperatur bzw. -enthalpie in Abhängigkeit des

Füllstoffgehaltes (x-Achse) und der Zykluszahl der DSC-Messung (y-Achse). Die Höhe der Schmelztemperatur bzw. -enthalpie lässt sich mithilfe der Farbskala bestimmen.

Es kann beobachtet werden, dass die Schmelztemperatur mit dem Füllstoffgehalt und mit der Zykluszahl abnimmt. Bei einer Maximaltemperatur von 275 °C ist dieser Effekt noch marginal, bei 325 °C jedoch deutlich zu erkennen. Die Schmelzenthalpie hingegen ist hauptsächlich vom Füllstoffgehalt abhängig. Erst bei 50 w-% Füllstoff und 325 °C Maximaltemperatur kann eine Verringerung der Schmelzenthalpie mit steigender Zyklusanzahl identifiziert werden.

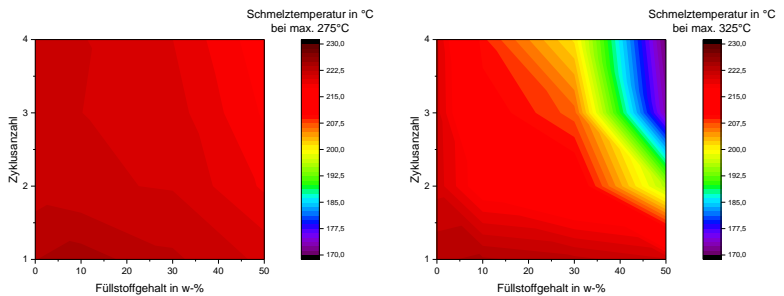


Abbildung 6.9: Schmelztemperaturen der PA-Compounds bei 275 °C und 325 °C Maximaltemperatur

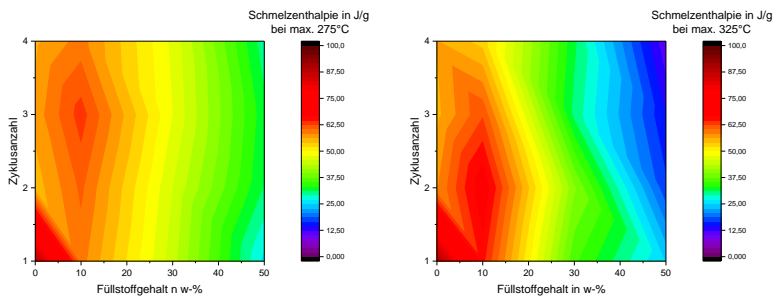


Abbildung 6.10: Schmelzenthalpien der PA-Compounds bei 275 °C und 325 °C Maximaltemperatur

Die beobachteten Effekte lassen sich durch die Verkürzung der Polyamidketten bei hohen Temperaturen erklären. Polyamid kann an seinen Amidbindungen am leichtesten gespalten werden, da die C-N-Bindung in der Amidgruppe mit 222 kJ/mol schwächer ist als die C-C-Bindungen im Rest der Molekülkette (335 kJ/mol) [86]. Bei ausreichend hohen Temperaturen und unendlich langer Zeit ist theoretisch eine Zersetzung zu niedermolekularen Verbindungen wie CO₂, NH₃, etc. möglich. Da die Verweilzeit bei hohen Temperaturen während der Messung nur wenige Minuten beträgt (Aufheiz- und Abkühlrate 10 K/min), ist lediglich von einer Kettenverkürzung und nicht von einer vollständigen Zersetzung auszugehen.

Bei hohen Füllstoffgehalten kann zusätzlich zu der thermischen Zersetzung des Polyamids eine hydrolytische Spaltung durch im Compound vorliegendes Wasser stattfinden. Die Hydrolyse von Polyamid läuft entsprechend der Reaktionsgleichungen in Abbildung 6.11 ab. Da bei der hydrolytischen Spaltung einer Amidbindung ein Wassermolekül verbraucht wird, hängt die Anzahl der gespaltenen Bindungen vom Feuchtegehalt ab. Bei geringen Wassergehalten ist also keine Spaltung in niedermolekulare Verbindungen, sondern lediglich eine Kettenverkürzung zu erwarten.

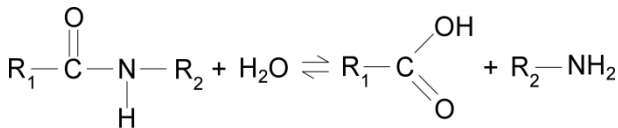


Abbildung 6.11: Reaktionsgleichungen der Hydrolyse von Polyamid nach [87]

Zusätzlich zur Spaltung der Polymerketten tritt ab ca. 250°C auch eine Zersetzung des Spuckstoffes auf (siehe Abbildung 5.3). Die hierbei entstehenden Spaltprodukte können die oxidativen und chemischen Abbaureaktionen beeinflussen und beschleunigen [86, 88].

Aus diesen Ergebnissen lässt sich schließen, dass insbesondere beim PA eine gründliche Trocknung des Spuckstoffes vor der

Compoundierung und eine weitere Trocknung des Granulates vor der Verarbeitung notwendig sind, um die Zersetzung des Materials zu verhindern. Informationen über sinnvolle Verarbeitungsfenster ohne Schädigung des Materials liefert die Untersuchung der Compounds mittels TGA.

6.1.3.2.2 Thermische Zersetzung

Ein typisches Ergebnis der TGA-Messungen für die Compounds aus PP und Spuckstoff ist in Abbildung 6.12 dargestellt, in diesem Fall für 50 w-% Spuckstoff. Es sind drei eindeutige Zersetzungsstufen zu erkennen. Zur einfacheren Auswertung werden diese durch die Maxima der Gewichtsänderung und die Gewichtsabnahme während dieser Stufe charakterisiert. Die Maxima befinden sich bei 275 °C, 303 °C und 405 °C. Der Gewichtsverlust während der Zersetzungsstufen beträgt 50,5%, 29,4% und 14,3%.

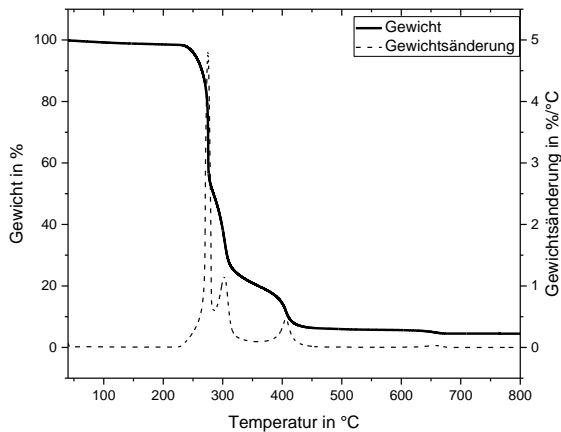


Abbildung 6.12: TGA-Kurve (durchgezogen) des Compounds mit 50 w-% PP und 50 w-% Spuckstoff sowie Ableitung der TGA-Kurve nach der Temperatur (gestrichelt)

Auf den ersten Blick scheint anhand der Masseabnahmen eine direkte Zuordnung der ersten Zersetzungsstufe (ca. 50 w-%) auf den Spuckstoffanteil (ebenfalls 50 w-%) möglich zu sein. Eine Be-

trachtung der Zersetzung der Einzelkomponenten (siehe Abbildung 6.13) zeigt jedoch, dass sowohl die Faserkomponente des Spuckstoffes, als auch das PP mehrere Zersetzungsstufen aufweisen, die sich zusätzlich überlappen. Eine getrennte Auftragung der einzelnen Zersetzungstemperaturen und Masseverluste liefert daher keine weiteren Auskünfte, die mit der Zusammensetzung der Compounds korrelieren. Für die Verarbeitung lässt sich aus den TGA-Kurven schlussfolgern, dass eine Temperatur unter ca. 250 °C nicht schädigend ist.

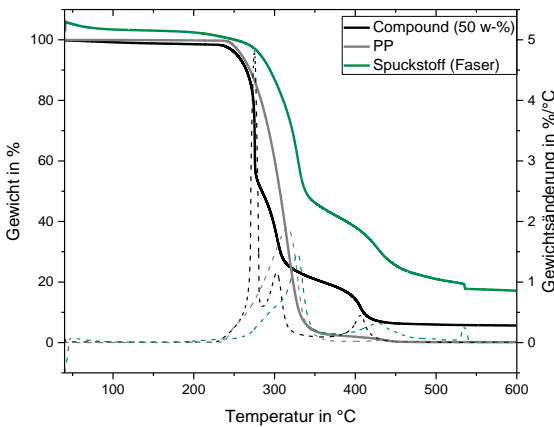


Abbildung 6.13: TGA-Kurven des Compounds mit 50 w-% PP und 50 w-% Spuckstoff sowie des PP und des Spuckstoffes

Die TGA-Kurven des reinen PA und der Compounds mit PA sind in Abbildung 6.14 dargestellt. Im Wesentlichen sind zwei Zersetzungsstufen zu erkennen, die sich mit zunehmendem Anteil Spuckstoff verschieben. Die erste Stufe wird zu geringeren Temperaturen verschoben. Dies deckt sich mit den durch die DSC-Messungen erhaltenen Ergebnissen, die auf eine verfrühte Zersetzung der PA-Spuckstoff-Compounds schließen ließen. Die zweite Zersetzungsstufe wird hingegen zu höheren Temperaturen verschoben.

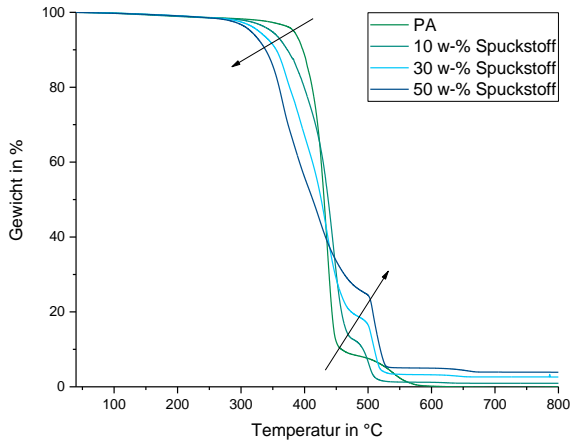


Abbildung 6.14: TGA-Kurven von PA und der Compounds mit PA

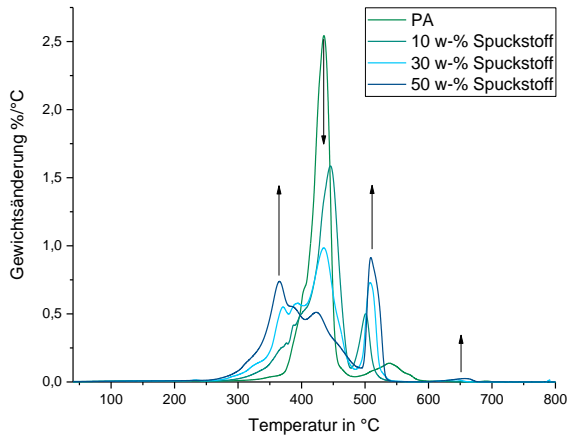


Abbildung 6.15: Nach der Temperatur abgeleitete TGA-Kurven von PA und der Compounds mit PA

Eine Betrachtung der nach der Temperatur abgeleiteten TGA-Kurven (siehe Abbildung 6.15) zeigt, dass nur bei dem reinen PA zwei Zersetzungsstufen auftreten. Die Compounds zersetzen sich, wie bereits beim PP gesehen, in mehreren sich überlappenden Stufen,

die nicht klar getrennt werden können. Trotzdem ist für drei der Stufen ein klarer Anstieg der Gewichtsänderung über die Temperatur mit steigendem Füllstoffgehalt zu erkennen. Die auf die Temperatur bezogene Gewichtsänderung bei 430 °C nimmt hingegen deutlich ab, sodass sich diese hauptsächlich dem PA zuordnen lässt. Wie bereits beim PP ist somit ein direkter Rückschluss von den TGA-Kurven auf die Zusammensetzung nicht möglich. Bei der Verarbeitung ist insbesondere bei höher gefüllten Compounds darauf zu achten, dass die maximale Verarbeitungstemperatur von ca. 250 °C nicht überschritten wird. Da PA eine im Vergleich mit PP höhere Schmelztemperatur besitzt, steht bei der Verwendung dieses Matrixwerkstoffes nur ein kleines Verarbeitungsfenster zur Verfügung, bei dem keine Zersetzung auftritt und die Viskosität für die verwendeten Fließprozesse ausreichend gering ist.

6.1.3.2.3 Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeiten der Compounds aus PP bzw. PA und Spuckstoff wurden bei 50 °C und bei 100 °C bestimmt. Für eine bessere Übersichtlichkeit sind in Abbildung 6.16 nur die Werte für 50 °C dargestellt. Die Messwerte für 100 °C weichen nur geringfügig davon ab.

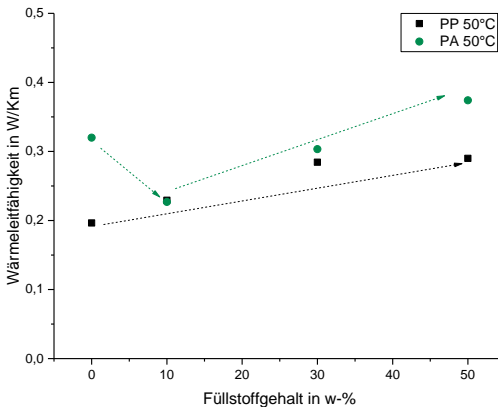


Abbildung 6.16: Wärmeleitfähigkeiten der Compounds mit PP bzw. PA bei 50 °C

Es ist zu sehen, dass die Wärmeleitfähigkeit für nahezu alle Füllstoffgehalte im Rahmen der Messgenauigkeit identisch ist. Weiterhin fällt auf, dass die Wärmeleitfähigkeit der Compounds mit PP mit steigendem Füllstoffgehalt zunimmt.

Beim PA nimmt die Wärmeleitfähigkeit von 0 w-% auf 10 w-% Spuckstoff signifikant ab, um danach nahezu linear wieder anzusteigen. Ein Grund hierfür könnte sein, dass im PA Agglomerate aus Spuckstofffasern vorliegen, die Luft eingeschlossen haben. Dadurch sinkt die Wärmeleitfähigkeit ab. Diese These wird dadurch unterstützt, dass bei 10 w-% Spuckstoffanteil im PA keine homogene Verteilung des Füllstoffs erreicht werden konnte, was bereits bei Betrachtung der Proben mit bloßem Auge sichtbar wird (siehe Abbildung 6.17).



Abbildung 6.17: Foto einer Probe aus PA und 10 w-% Spuckstoff

Da faserhaltige Reststoffe aus der Papierindustrie z.B. als Isolationsmaterialien eingesetzt werden [40], war zu erwarten, dass der Spuckstoff auch in Kombination mit Kunststoffen eine bessere Isolation und damit eine geringere Wärmeleitfähigkeit bewirkt. Diese konnte nicht erzielt werden. Die Wärmeleitfähigkeit ergibt sich aus der Wärmeleitfähigkeit der Einzelmaterialien. Der Spuckstoff scheint eine höhere Wärmeleitfähigkeit als die Kunststoffmatrix zu besitzen und erhöht somit die Wärmeleitfähigkeit der Compounds mit steigendem Füllstoffgehalt.

6.1.3.2.4 Fließverhalten

Um das Fließverhalten der Compounds zu charakterisieren, wurden sowohl Messungen mittels Rotationsrheometer, als auch mittels Fließspirale durchgeführt. Für die Messungen am Rotationsrheometer wurden 2 mm dicke Proben verwendet. Ergänzend wurden von einigen Mischungen Probekörper in dünnerer Stärke (1 mm) hergestellt, deren Ergebnisse im Anhang aufgeführt sind.

Die gemessenen Viskositäten der 1 mm dicken Proben sind etwas tiefer, als die der 2 mm dicken Proben.

In Abbildung 6.18 und Abbildung 6.19 sind die Viskositäten der Compound mit PP und PA über die Winkelfrequenz aufgetragen. Alle Compounds zeigen eine Abnahme der Viskosität mit steigender Winkelfrequenz. Bei Auftragung in der doppelt-logarithmischen Skala zeigen sich annähernd lineare Verläufe. Dies deutet auf ein strukturviskoses Fließverhalten hin, das für Kunststoffe typisch ist.

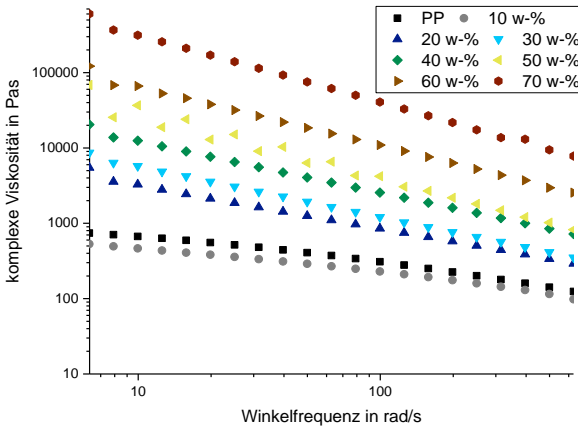


Abbildung 6.18: komplexe Viskosität der Compounds mit PP

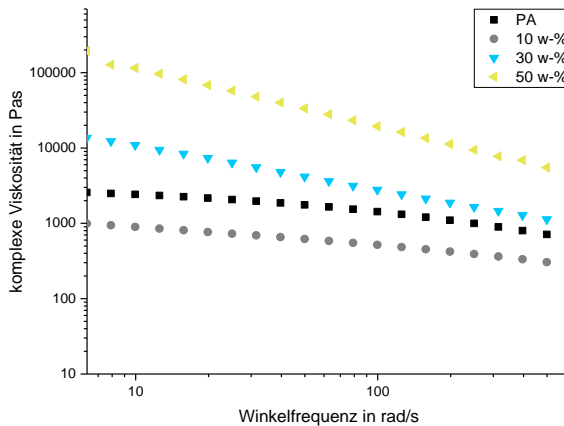


Abbildung 6.19: komplexe Viskosität der Compounds mit PA

Um einen Vergleich der PP- und PA-Compounds zu ermöglichen und die Abhängigkeit vom Füllstoffgehalt besser sichtbar zu machen, wurde zusätzlich in Abbildung 6.20 die Viskosität der Compounds bei einer exemplarischen Winkelgeschwindigkeit von 100 rad/s in gegen den Füllstoffgehalt aufgetragen.

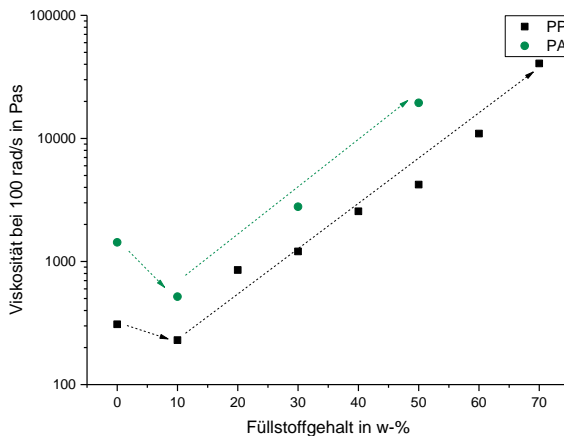


Abbildung 6.20: Viskosität der Compounds mit PP bzw. PA bei 100 rad/s in Abhängigkeit des Füllstoffgehaltes

Bei der Betrachtung der Compounds mit PP ist zu erkennen, dass zwischen 20 w-% und 70 w-% ein Anstieg der Viskosität aus der Zugabe des Spuckstoffs resultiert. Interessant ist das Verhalten des Compounds mit 10 w-%. Hier ist gegenüber dem reinen Polypropylen eine Abnahme der Viskosität zu verzeichnen. Dies entspricht nicht den Erwartungen, da ein bei der Messtemperatur fester Stoff, die Viskosität erhöhen müsste.

Bei den Compounds mit PA ist die Viskositätsabnahme von 0 w-% Spuckstoff auf 10 w-% ebenfalls zu erkennen. Danach steigt die Viskosität erwartungsgemäß an. Die bei beiden Matrixsystemen auftretende Abnahme der Viskosität bei geringen Füllstoffgehalten kann mit dem Effekt der Schergeschwindigkeitsüberhöhung begründet werden. Der Spuckstoff liegt bei der Messtemperatur als Feststoff vor und wird lediglich von der Kunststoffschmelze mitgeschleppt. Zwischen den Fasern des Spuckstoffes fließt die Schmelze schneller, sodass es zu einer Schergeschwindigkeitsüberhöhung kommt. Die reale Geschwindigkeit zwischen den Fasern ist somit höher, als die im ungefüllten Kunststoff. Die höhere Geschwindigkeit entspricht somit einer höheren Scherrate bei gleicher äußerer Winkelfrequenz. Ab 20 w-% überlagert sich die Schergeschwindigkeitsüberhöhung mit dem wesentlich stärkeren Effekt der Viskositäts-erhöhung durch den nicht fließfähigen Spuckstoff, sodass insgesamt ein Anstieg der Viskosität resultiert.

Bei der Bestimmung der Fließweglängen der Fließspiralen ergeben sich die in Abbildung 6.21 und Abbildung 6.22 dargestellten Werte. Die Compounds mit PP zeigen eine Fließwegverkürzung mit steigendem Füllstoffgehalt, durch die sinkende Viskosität des Materials. Gleichzeitig führt ein erhöhter Einspritzdruck zu längeren Fließwegen, da die Scherrate mit steigendem Einspritzdruck steigt und somit die Viskosität sinkt. Die Viskositätsabnahme von 0 w-% zu 10 w-%, die bei den Rotationsrheometer-Messungen aufgetreten ist, kann bei der Messung der Fließweglängen bei PP nicht beobachtet werden. Bei den Compounds mit PA ist die Schergeschwindigkeits-

überhöhung wieder klar zu erkennen. In diesem Fall tritt sie so deutlich auf, dass die Fließweglängen bei allen betrachteten Füllstoffgehalten höher sind, als bei dem ungefüllten PA. Von 10 w-% über 30 w-% bis 50 w-% ist eine Abnahme der Fließweglänge, also eine Zunahme der Viskosität zu sehen.

Im Vergleich der beiden Matrixsysteme miteinander zeigt PA kürzere Fließwege. Bei größeren, dünnwandigen Bauteilen, könnte dies dazu führen, dass das Werkzeug nicht vollständig gefüllt wird.

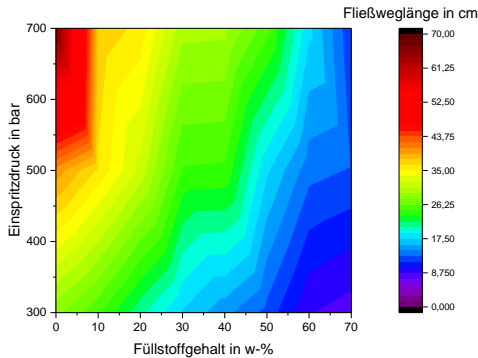


Abbildung 6.21: Fließweglängen der Compounds mit PP bei verschiedenen Einspritzdrücken

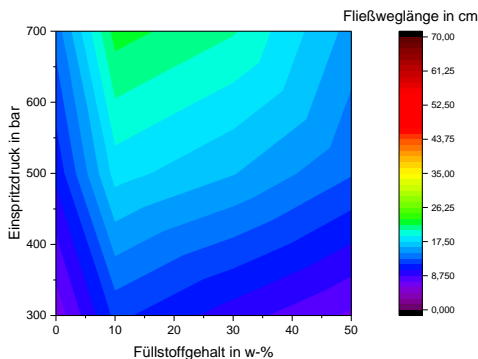


Abbildung 6.22: Fließweglängen der Compounds mit PA bei verschiedenen Einspritzdrücken

6.1.3.3 Sonstige Eigenschaften

6.1.3.3.1 Wasseraufnahme

Die relative Wasseraufnahme der Compounds aus Spuckstoff und PP oder PA nach 150 min in siedendem Wasser ist in Abbildung 6.23 dargestellt. Bei den Compounds mit PP ist zu erkennen, dass die Wasseraufnahme von 0 % beim ungefüllten PP auf ca. 2,5 % Wasseraufnahme bei 50 w-% Füllstoffgehalt ansteigt. Die lignocellulosischen Fasern des Spuckstoffes sind hydrophil und nehmen Wasser auf. Je höher der Faseranteil in der Probe ist, desto mehr Wasser kann aufgenommen werden. Die Steigerung ist dabei der Mischungsregel folgend annähernd linear.

Beim PA tritt diese Zunahme der Wasseraufnahme mit steigendem Spuckstoffgehalt nicht auf. Der Kunststoff ist bereits ohne Spuckstoff hydrophil und kann ca. 6 % Wasser aufnehmen. Im Rahmen der Messgenauigkeit kann durch Zugabe des Spuckstoffes keine Veränderung der Wasseraufnahmefähigkeit beobachtet werden.

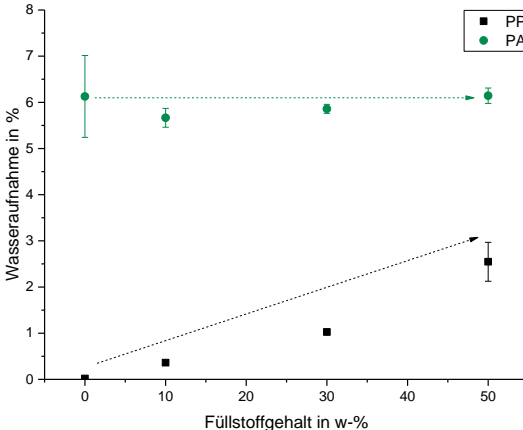


Abbildung 6.23: Wasseraufnahme der Compounds mit PP oder PA nach 150 min Lagerung in siedendem Wasser

6.1.3.4 Schimmelpilzresistenz

Die Ergebnisse der Messungen zum Verhalten der Compounds in Gegenwart von Schimmelpilzsporen können in die beiden verwendeten Verfahren A und Verfahren B nach DIN EN ISO 846 [71] aufgeteilt werden. In beiden Verfahren wurde eine individuelle Bewertung des Schimmelbewuchses auf einer Skala von 0 bis 5 vorgenommen, wobei 0 „kein Bewuchs“ und 5 „starker Bewuchs“ bedeutet.

Die Bewertungen der Compounds für Verfahren A sind in Abbildung 6.24 und Abbildung 6.25 als Farbschema dargestellt. Die reine PP-Probe zeigt bei diesem Verfahren als einziges Material über den gesamten Prüfzeitraum keinen Bewuchs. Das reine PA sowie alle Compounds mit Spuckstoff lassen bereits nach einer Woche unter dem Mikroskop oder sogar mit bloßem Auge Schimmelwachstum auf der Probenoberfläche erkennen. Nach vier Wochen waren bis auf das reine PP alle Proben stark bewachsen. Laut Prüfbericht sind diese Materialien „nicht resistent gegen Schimmelpilzbefall“ und enthalten „Nährstoffe, für deren Entwicklung“ [89].

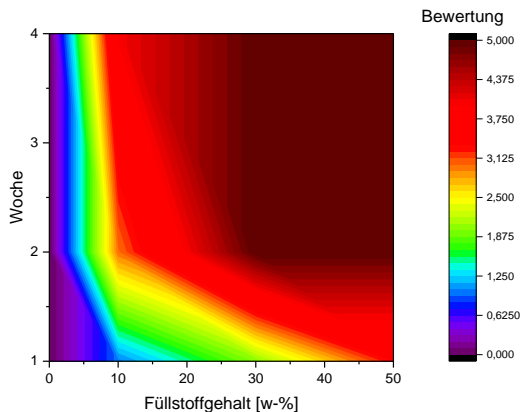


Abbildung 6.24: Bewertung des Schimmelbewuchses der Compounds mit PP in Abhängigkeit des Füllstoffgehaltes und der Prüfdauer in Wochen nach Verfahren A

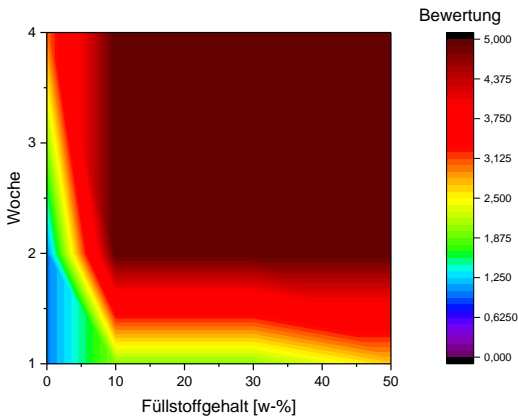


Abbildung 6.25: Bewertung des Schimmelbewuchses der Compounds mit PA in Abhängigkeit des Füllstoffgehaltes und der Prüfdauer in Wochen nach Verfahren A

Im Vergleich der beiden Matrixsysteme ist klar zu erkennen, dass die Compounds mit PA schneller stärker bewachsen wurden. Dies hängt mit der stärkeren Wasseraufnahme (siehe Kapitel 6.1.3.3.1) zusammen, die eine Diffusion der Nährstoffe an die Oberfläche der Probe, bzw. ein Eindringen der Pilzsporen in die Probe begünstigt.

Verfahren B unterscheidet sich von Verfahren A durch die Zugabe einer Glukoselösung zu den Proben, die den Schimmelbewuchs fördert. Bei den Proben mit PP, dargestellt in Abbildung 6.26, ist zu sehen, dass die Werte im Vergleich zu Verfahren A allgemein höher sind. Auch das reine PP zeigt nun einen leichten Bewuchs. Auffällig sind die Bewertungen bei den Proben mit 30 w-% Füllstoff nach zwei Wochen und mit 50 w-% Füllstoff nach einer Woche, die unterhalb der Bewertungen in Verfahren A liegen. Dies ist auf die Messmethodik zurückzuführen. Die Proben werden optisch von einer Person begutachtet und anhand des bereits in Kapitel 4.3.2 vorgestellten Bewertungsschemas in Tabelle 4.5 bewertet. Diese Bewertung ist rein subjektiv, sodass es bei Proben, die sich auf der

Grenze zwischen zwei Bewertungen befinden, zu Fehlern kommen kann.

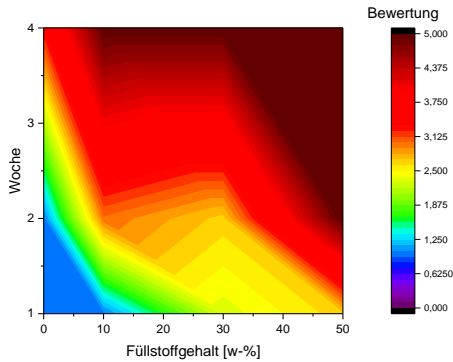


Abbildung 6.26: Bewertung des Schimmelbewuchses der Compounds mit PP in Abhängigkeit des Füllstoffgehaltes und der Prüfdauer in Woche nach Verfahren B

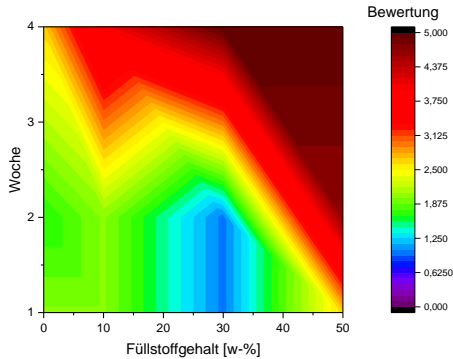


Abbildung 6.27: Bewertung des Schimmelbewuchses der Compounds mit PA in Abhängigkeit des Füllstoffgehaltes und der Prüfdauer in Woche nach Verfahren B

Die Zugabe der Glukose ändert das Verhalten der Proben mit PA (siehe Abbildung 6.27) als Matrix kaum. Bei einigen Füllstoffgehalten und Messzeitpunkten kann sogar eine Verbesserung des

Schimmelverhaltens festgestellt werden. Dies kann sowohl bei PP, als auch bei PA mit dem unterschiedlichen Wachstum der verschiedenen verwendeten Schimmelpilze zusammenhängen. Wie in Abbildung 6.28 am Beispiel der Proben aus PP mit 50 w-% Spuckstoff zu erkennen ist, sind bei Verfahren A sowohl die Probe, als auch der Boden der Petrischale mit bräunlichen, runden Pilzen (*Aspergillus niger*) befallen. Bei Verfahren B ist durch Zugabe der Glukose ein verstärktes Wachstum einer weißen Schimmelart (*Talaromyces funiculosus* oder *Chaetomium globosum*) insbesondere auf dem Nährboden aufgetreten. Die in Verfahren A gewachsenen Pilze haben einen geringen Kohlenstoffbedarf und wachsen aufgrund des Kohlenstoffüberangebots in Verfahren B weniger. Die in Verfahren B überwiegend auf dem Nährmedium aufgetretenen Pilze können zwar die Glukose gut verwerten, haben teilweise aber Probleme damit auf der Probenoberfläche zu wachsen.

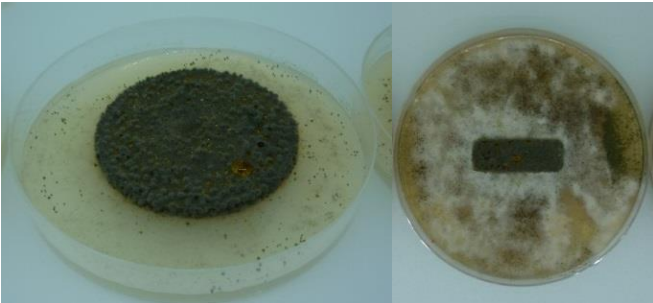


Abbildung 6.28: Proben aus PP und 50 w-% Spuckstoff nach 4 Wochen im Brutschrank (links Verfahren A, rechts Verfahren B) nach [89]

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass alle Compounds mit Spuckstoff unter entsprechenden Bedingungen zu Schimmelbewuchs neigen. Eine Anwendung in warmen, feuchten Umgebungen, in denen Schimmelsporen potentiell vorhanden sind, sollte somit vermieden werden. Wichtig ist hierbei zu erwähnen, dass aus den Untersuchungen nicht hervorgeht, dass das Material von sich aus, also ohne Anwesenheit von Schimmelsporen in der Umgebung zum

Schimmeln neigt. Durch die vorherige Verarbeitung des Materials bei Temperaturen oberhalb von 180 °C ist davon auszugehen, dass alle möglicherweise im Spuckstoff vorliegenden Schimmelpilze abgetötet werden.

6.1.4 Kostenabschätzung und Anwendungsbeurteilung

Die für die Spuckstoff-Compounds anzunehmenden Kosten setzen sich vorwiegend aus den Kosten für die Ausgangsmaterialien und die Verarbeitungskosten zusammen. Das Flussdiagramm in Abbildung 6.29 zeigt die Materialien bzw. Produkte und die notwendigen Verarbeitungsschritte auf. Anhand dieses Diagramms werden im Folgenden die Kosten berechnet

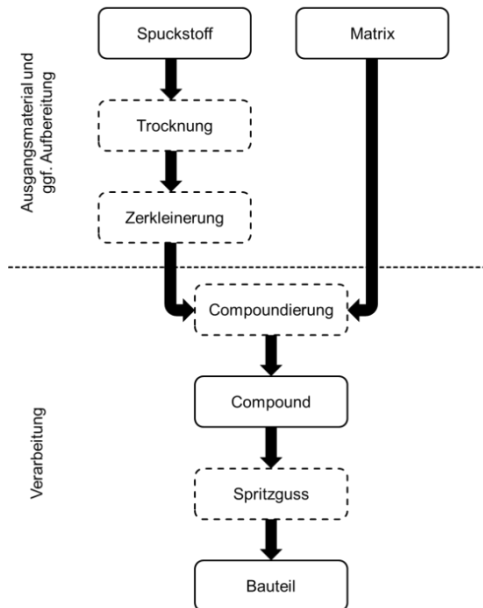


Abbildung 6.29: Flussdiagramm zur Herstellung von Bauteilen aus Spuckstoff-Compounds mit den notwendigen Verarbeitungsschritten

Als Ausgangsmaterialien liegen der Spuckstoff und die Kunststoffmatrix vor. Da die Matrix kommerziell erworben und nicht selbst

hergestellt wird, können hierfür aktuelle Marktpreise angenommen werden. Die Marktpreise aus dem Dezember 2018 für PP und PA sind in Tabelle 6.7 angegeben [90]. Die Preise der beiden verwendeten Matrixsysteme konnten nicht ermittelt werden, weil es sich in beiden Fällen um Restbestände handelte und die Polymere zur Veröffentlichung der vorliegenden Arbeit nicht mehr in dieser Zusammensetzung produziert wurden. Für die Kostenabschätzung ist dies, aufgrund verhältnismäßig hoher Schwankungen des Kunststoffpreises, der an den Ölpreis gekoppelt ist, nicht kritisch.

Tabelle 6.7: Marktpreise für PP und PA, Dezember 2018 [90]

Material	Preis in €/t
PP	960
PA	2080

Die Kosten für den zur Compoundierung geeigneten Spuckstoff ergeben sich aus den Kosten für die Trocknung und die Zerkleinerung sowie den Ausgangsspuckstoff. Aktuell wird der Spuckstoff kostenpflichtig entsorgt. Dabei fallen für die Papierfabrik 100 €/t Entsorgungskosten zuzüglich 5 €/t für den Transport an [91]. Für die weiteren Betrachtungen wird ein fiktives Spuckstoff-Aufkommen von 8.000 t/a in einer Papierfabrik angenommen. Bereits die kostenlose Abgabe des noch feuchten Spuckstoffes würde somit eine Kostenersparnis von 840.000 €/a bedeuten.

Einen Abnehmer für den nicht getrockneten und nicht zerkleinerten Spuckstoff zu finden, ist momentan nicht realistisch, da es noch keinen Markt für mit Spuckstoff verstärkte Compounds auf dem Markt gibt, die eine Anfrage eines Compoundierers hervorrufen könnte. Daher wird im weiteren Szenario davon ausgegangen, dass die Trocknung und Zerkleinerung durch den Betreiber der Papierfabrik und optimalerweise direkt auf dem Werksgelände, auf dem der Spuckstoff anfällt, durchgeführt wird.

Zur industriellen Trocknung des relativ feuchten Spuckstoffs eignet sich beispielsweise ein Bandrockner. Die feuchten Fasern werden

dabei auf ein perforiertes, mit warmer Luft durchströmtes Band aufgebracht. Das Band bewegt sich kontinuierlich durch den Trockner, sodass am Ende des Trockners ein konstanter Strom getrockneten Spuckstoffs erhalten wird. Die zur Trocknung benötigte warme Luft kann extra dafür erwärmt werden oder aus Abwärme anderer Prozesse stammen. Für den Betrieb in einer Papierfabrik könnte sich die Verwendung von Abluft aus der Papiertrocknung eignen. Hierbei dürfte allerdings die Luftfeuchtigkeit der Abluft nicht zu hoch sein, sodass in den folgenden Betrachtungen davon abgesehen wird.

Ein Angebot für einen geeigneten Bandtrockner wurde von ENGELHARDT und SCHRÖDER im Rahmen einer Projektarbeit eingeholt [91]. Die daraus für die Berechnung der Trocknungskosten zugrunde gelegten Zahlen und Überlegungen sind in Abbildung 6.30 dargestellt.

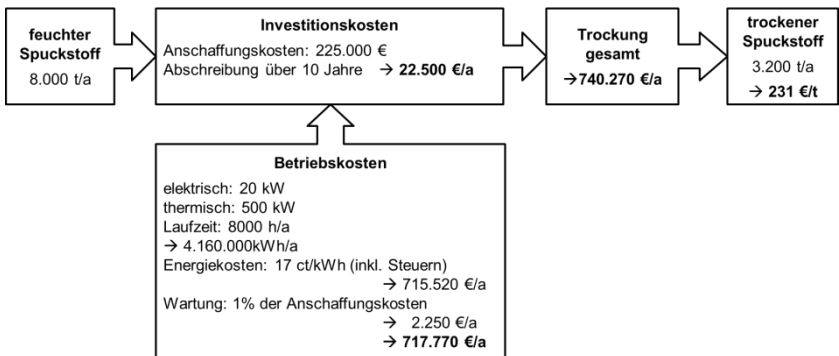


Abbildung 6.30: Berechnung der Trocknungskosten

Im betrachteten Verarbeitungsprozess werden die während der Trocknung generierten Faseragglomerate mit einer Schneidmühle zerkleinert. Für den relativ geringen Eingangsstrom konnte in Recherchen kein Angebot für ein geeignetes Zerkleinerungsaggregat erhalten werden. Ein Dienstleistungsunternehmen aus der kunststoffverarbeitenden Industrie könnte jedoch die Zerkleinerung für den in Abbildung 6.31 angegebenen Preis durchführen.

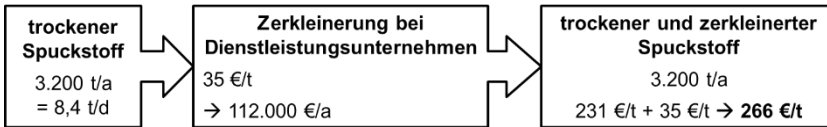


Abbildung 6.31: Berechnung der Zerkleinerungskosten

Insgesamt kostet die Trocknung und Zerkleinerung des Spuckstoffes bis hin zum compoundierbaren Zustand 266 €/t bzw. 852.270 €/a. Dem gegenüber stehen, wie bereits beschrieben, 840.000 €/a Entsorgungskosten. Die Mehrkosten für eine Aufbereitung des Spuckstoffes im Vergleich mit der Entsorgung sind somit gering.

Zu beachten gilt hierbei, dass in diesen Wert variable und von der Struktur der Papierfabrik abhängige Kosten nicht einberechnet sind. SCHRÖDER und ENGELHARDT [91] geben in ihrer Arbeit zusätzlich einen Pauschalbetrag von 85 €/t als variable Kosten für Vertriebs-, Verwaltungs-, Materialgemein- und Transportkosten an. Unter Einbeziehung dieser und der zuvor genannten und nicht berücksichtigten Kosten, wäre es für die Papierfabrik möglich den getrockneten, zerkleinerten Spuckstoff für schätzungsweise 200 €/t mit einem positiven Deckungsbeitrag zu verkaufen. Diese Überlegung bezieht sich darauf, dass die aktuell gezahlten Entsorgungskosten als sonst entstehender Verlust angesehen werden. Werden diese Kosten nicht mitberücksichtigt, muss der getrocknete, zerkleinerte Spuckstoff für über 350 €/t verkauft werden, um die Trocknungs- und Zerkleinerungskosten, sowie die weiteren Kosten zu decken. Im Folgenden wird mit 350 €/t gerechnet, da die Papierfabrik zwar ein Interesse daran hat den aktuell entstehenden Aufwand durch die Entsorgungskosten zu reduzieren, die beschriebenen Investitionen jedoch auch Gewinn erzeugen sollen.

Der getrocknete und zerkleinerte Spuckstoff wird im nächsten Prozessschritt mit der Matrix zusammen compoundiert. Für die Compoundierung in einem Zweischnellenextruder mit geeignetem Materialdurchsatz veranschlagt ein im Rahmen der Recherche

kontaktiertes Dienstleistungsunternehmen 280 € pro Tonne granuliertes Compound [91]. Die für das Granulat resultierenden Kosten korrelieren somit linear mit dem Füllstoffgehalt und sind abhängig von den Materialkosten für die Matrix. Der Preisverlauf über den Füllstoffgehalt der Compounds mit PP und PA ist in Abbildung 6.32 dargestellt. Zum Vergleich ist gestrichelt jeweils der Preis in €/t für das ungefüllte Matrixmaterial angegeben. Aufgrund des geringen Preises für PP kann erst ab 46 w-% Spuckstoffgehalt eine Kosteneinsparung im Vergleich zum PP erzielt werden. Beim PA kann trotz der Kosten für die Compoundierung bereits ab 16 w-% Spuckstoff ein günstigeres Material erhalten werden.

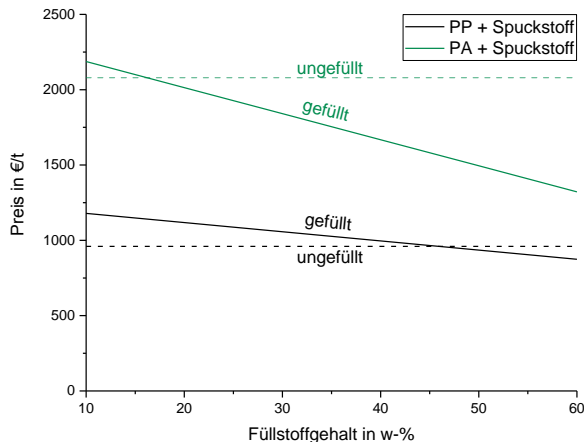


Abbildung 6.32: Verlauf des Preises für die Compounds aus PP bzw. PA in Abhängigkeit vom Füllstoffgehalt

Nach der Compoundierung folgt im Prozess die Verarbeitung z.B. im Spritzgussprozess zum Bauteil. Die hierfür zu veranschlagenden Kosten sind unter anderem abhängig von der Bauteilgröße, den Prozessparametern, dem Spritzgusswerkzeug, der eingesetzten Spritzgussmaschine (elektrisch- oder hydraulisch), etc. Bei einigen Bauteilen würde sich ggf. auch eine Verarbeitung mittels Extrusion anbieten. Eine vollumfängliche, allgemeingültige Betrachtung würde den Rahmen der vorliegenden Arbeit übersteigen. Daher werden an

dieser Stelle drei Anwendungen und Bauteile ausgewählt. Die Auswahl wird anhand der in Kapitel 6.1.3 bestimmten Eigenschaften diskutiert.

Fassadendämmung und -verkleidung:

ENGELHARDT und SCHRÖDER behandelten im Rahmen ihrer Arbeit den Einsatz der Spuckstoffcompounds als Fassadendämmung bzw. -verkleidung [91]. Der Unterschied dieser beiden Isolationskonzepte liegt darin, dass die Fassadendämmung zwischen Außenwand und Verkleidung angebracht wird, während die Fassadenverkleidung die äußerste Schicht des Wandaufbaus darstellt. In beiden Anwendungsfällen ist die mechanische Belastung verhältnismäßig gering. Die lasttragende Komponente stellt das Mauerwerk dar. Bei der Fassadenverkleidung kann es beispielsweise im Falle eines Sturmes zu schlagartigen Belastungen kommen. Die Schlagzähigkeitsmessung (6.1.3.1.2) konnten zeigen, dass mit steigendem Spuckstoffanteil die Schlagzähigkeit abnimmt. Das beste Verhalten zeigten mit Abstand die ungefüllten Compounds. Beim Einsatz der Spuckstoff-Compounds als Fassadenverkleidung könnte es im Vergleich mit ungefüllten Kunststoffen somit vermehrt zu Materialversagen kommen.

Im Außeneinsatz sind auch die Schimmelpilzresistenz und die Wasseraufnahme von Bedeutung. Da bis auf das ungefüllte PP alle untersuchten Materialien Schimmelwachstum zeigten, kann keine Priorisierung durchgeführt werden. Grundsätzlich gilt es hier darauf zu achten, dass ein Einsatz in Regionen mit feuchtem und warmem Klima problematisch sein könnte. Bezüglich der Wasseraufnahme konnte gezeigt werden, dass die Compounds mit PP wesentlich weniger Wasser aufnehmen, als die mit PA-Matrix. Die PA-Compounds sollten somit nicht im direkten Kontakt mit hoher Luftfeuchte bzw. Regen eingesetzt werden, da die Wasseraufnahme zu einer Volumenvergrößerung und ggf. zu Delaminationen und Rissen im Compound führt. Bei den PP-Compounds ist darauf zu

achten, dass die Wasseraufnahme mit steigendem Spuckstoffgehalt zunimmt.

Für die Fassadendämmung sind die Schimmelpilzresistenz und die Wasseraufnahme zweitrangig, da das Material nicht unmittelbar bewittert wird. Bei einer fachmännisch aufgebauten Fassade entsteht zwischen Verkleidung und Dämmung ein Luftstrom, der Feuchtigkeit abtransportiert [92]. So wird die Schimmelbildung an der Dämmung vermieden. Die Wasseraufnahme ist nur insofern relevant, dass diese mit der Diffusion von Wasserdampf durch das Material korreliert. Für die Dämmung wären somit die Compounds aus PA eher geeignet, da diese einen Abtransport von Feuchtigkeit aus den Innenräumen ermöglichen.

Sowohl für die Dämmung, als auch die Verkleidung ist die Wärmeleitfähigkeit eine entscheidende Größe. Die bestimmten Wärmeleitfähigkeiten liegen zwischen $0,2 \text{ W/K}\cdot\text{m}$ und $0,35 \text{ W/K}\cdot\text{m}$ und zeigen keine eindeutige Abhängigkeit vom Füllstoffanteil. Die Eignung für den Einsatz kann nur im Vergleich mit bereits verwendeten Materialien erfolgen. Als Dämmmaterialien werden heutzutage vorrangig Mineralwollen oder Platten aus EPS eingesetzt. Beide Materialien besitzen Wärmeleitfähigkeiten zwischen $0,03 \text{ W/Km}$ und $0,05 \text{ W/Km}$ [91]. Die Wärmeleitfähigkeit ist um den Faktor 10 kleiner, als die der hergestellten Compounds. Für die Dämmung sind sie daher nicht geeignet.

Ein häufig zur Fassadenverkleidung eingesetztes Material ist Schiefer. Die Wärmeleitfähigkeit liegt bei ca. 2 W/Km und damit deutlich oberhalb der der Spuckstoff-Compounds. Unter Einbeziehung der anderen diskutierten Eigenschaften ist der Einsatz als Fassadenverkleidung also grundsätzlich denkbar. Ein beispielhaftes Fassadenelement ist in Abbildung 6.33 dargestellt. Die Löcher dienen dabei der Befestigung, da die Kunststoffelemente nicht wie vergleichbare Holzschindeln angenagelt werden können.

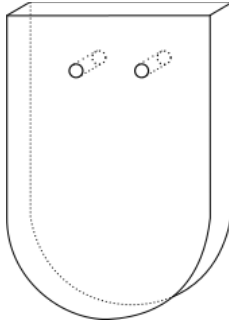


Abbildung 6.33: Geometriebeispiel für ein Fassadenelement aus Spuckstoff-Compounds

Aufgrund des Wasseraufnahmeverhaltens sollte sich bei der Nutzung als Fassadenverkleidung auf die Compounds mit PP-Matrix beschränkt werden. Die mögliche Schimmelbildung ist ein Nachteil, der unter realen Bedingungen in Bewitterungsversuchen zu überprüfen wäre und zusätzlich abhängig von der Region ist. Da in Mitteleuropa auch andere Materialien organischen Ursprungs (z.B. Holzschindeln wie in Abbildung 6.34 zu sehen), die das Potential zum Schimmelwachstum besitzen, häufig als Fassadenverkleidung eingesetzt werden, sollte dies in der theoretischen Diskussion kein Ausschlusskriterium sein.



Abbildung 6.34: z.T. durch Schimmel und andere Mikroorganismen angegriffene Holzschindeln

Zum Überschlagn der Kosten einer Fassadenverkleidung aus den PP-Spuckstoff-Compounds wird angenommen, dass einzelne, flächige Fassadenelemente mit ca. 80 g pro Stück im Spritzgussprozess hergestellt werden. Eine grobe Übersicht der in die Kostenberechnung eingegangenen Überlegungen ist grafisch in Abbildung 6.35 dargestellt. Die genaue Berechnung für ein Fassadenelement aus 40 w % Spuckstoff und 60 w-% PP wurde anhand einer frei verfügbaren Kalkulationstabelle [93] durchgeführt, die in Abbildung 12.8 im Anhang erfasst ist. Hierbei ergibt sich ein Stückpreis von ca. 1,40 €.

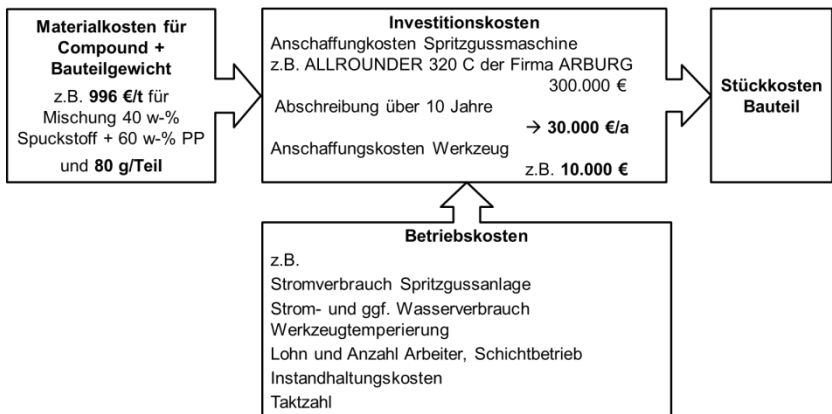


Abbildung 6.35: Übersicht zu berücksichtigender Kosten bei der Kalkulation eines Spritzgussbauteils (Preis Spritzgussmaschine nach [94])

Für die Verwendung als Fassadenelement sind des Weiteren die in Tabelle 6.8 aufgeführten Einflussfaktoren und Kosten zu berücksichtigen:

Tabelle 6.8: Kostenkalkulation für eine Fassade aus PP-Spuckstoff-Compounds

Eigenschaft	Wert
Materialdichte	Ca. 1 g/cm ³
Bauteilgewicht	80 g
Dicke des Fassadenelements	1 cm
Fläche	→ 80 cm ² /Element
Stückpreis	1,40 €
Quadratmeterpreis	→ 17,50 €/m ²
Verlegung (pauschal)	40 €/m ²
Gesamtkosten	→ 57,50 €/m ² → ca. 60 €/m ²

Der Wert für die Verlegung ist abhängig vom ausführenden Handwerksbetrieb und der Komplexität des Musters der Fassadenverkleidung und ist damit nur als Richtwert zu sehen. Die Gesamtkosten belaufen sich somit auf ca. 60 €/m². Dieser Preis wird auch für Schieferverkleidungen als Minimalpreis angegeben [95]. Die Spuckstoff-Compounds stehen aufgrund ihrer besseren Wärmeisolierung bei geringeren oder maximal gleichen Kosten also in direkter Konkurrenz zu Schiefer. In Anbetracht der aktuellen Umweltdebatte könnte durch den Einsatz von Spuckstoffen als Recyclingmaterial ein Argument für den Einsatz der Elemente aus den Spuckstoff-Compounds gegeben sein. Dem gegenüber steht die allgemein gute Ökobilanz von Schiefer, der langlebig ist und nach der Verwendung als Schiefersplitt oder Schiefermehl einer weiteren Nutzung zugeführt werden kann.

Automobilindustrie:

Ein weiteres Anwendungsfeld für die Spuckstoff-Compounds ist die Automobilindustrie. Da mit den Compounds die mechanischen Kennwerte (insbesondere die Schlagzähigkeit) metallischer Materialien oder faserverstärkter Duroplasten nicht erreicht werden

können, beschränkt sich das Einsatzpotential auf nicht strukturell belastete Bauteile, wie Türinnenverkleidungen oder Handschuhfächer. Diese werden aktuell aus mineralisch oder mit Naturfasern gefüllten Thermoplasten hergestellt [96-98]. Die zur Verarbeitung verwendeten Prozesse und deren Parameter können für NFK und die Spuckstoff-Compounds als beinahe identisch angenommen werden. Die Prozesskosten gleichen einander somit ebenfalls. Unterschiede resultieren demnach nur aus den Kosten bis zum verarbeitbaren Granulat. In Kapitel 6.3 folgt die Betrachtung unterschiedlicher NFK als Referenzmaterialien inkl. ihrer Herstellungskosten. Ein Vergleich der Materialien, ihrer Eigenschaften und der Kosten wird daher erst bei der Gesamtbetrachtung in Kapitel 8 durchgeführt.

Aufbewahrungsbox:

Als weitere Anwendung wurde der Einsatz als Aufbewahrungsbox für Kleinteile (z.B. Schrauben) gewählt. Diese Auswahl erfolgte, da ein geeignetes Heißkanalwerkzeug zur Erprobung zur Verfügung stand und das Bauteil als solches nur geringen Anforderungen unterliegt. Hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften ist die Box durch ihren Inhalt, sowie ggf. weitere darauf gestapelte Boxen belastet. Schlagbelastungen treten nur beim Befüllen der Box in geringem Umfang oder bei unsachgemäßer Verwendung, wenn die Box beispielsweise fallen gelassen wird, auf. Die bestimmten Schlagzähigkeiten der Compounds reichen aus, um diesen Belastungen Stand zu halten. Solange die Box in geschlossenen Räumen und nicht zur Lagerung von Flüssigkeiten eingesetzt wird, sind das Wasseraufnahmeverhalten und die Schimmelresistenz des Materials nebensächlich. Das für den Einsatz passende Eigenschaftsprofil bringt das Material somit mit sich.

Für die Verarbeitung sind zusätzlich die Verarbeitungstemperaturen, sowie die Viskosität von Bedeutung. Hier zeigte sich bei der Erprobung, dass der Heißkanal, der in dem Werkzeug eingebaut war, auf 350 °C erhitzt werden musste, um ein Verstopfen des

Kanals zu verhindern. Diese erhöhte Temperatur könnte zu einer Zersetzung des Materials führen.

Dies trat sowohl bei ungefülltem PP, als auch bei den Compounds auf. In den fertigen Bauteilen konnte eine Degradation nicht festgestellt werden, da die Verweilzeit der Schmelze im Heißkanal unterhalb einer Sekunde liegt. Um ausreichend niedrige Viskositäten zu erreichen und Verstopfungen zu vermeiden, wurden die Heizzonen der Schnecke auf 190 °C am Einzug bis zu 240 °C an der Düse eingestellt. Der Einspritzdruck betrug 1000 bar, das Dosiervolumen 78 cm³ und die Werkzeugtemperierung 110 °C. Mit diesen Parametern konnte eine vollständige Werkzeugfüllung ohne Überspritzungen für ein ungefülltes PP und mit bis zu 30 w-% Spuckstoff gefülltes PP gewährleistet werden. Zwei beispielhafte Boxen sind in Abbildung 6.36 dargestellt.

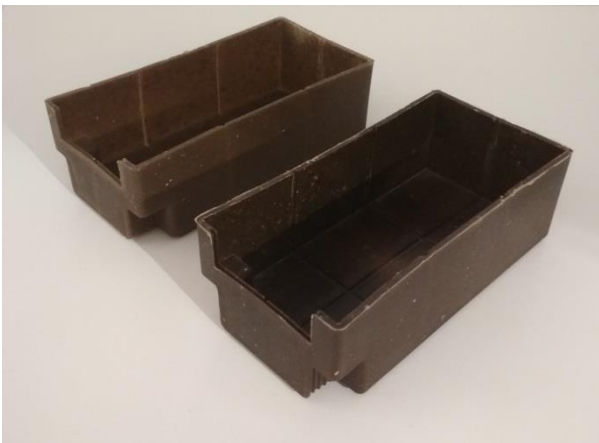


Abbildung 6.36: Aus 10 w-% (links) bzw. 30 w-% (rechts) Spuckstoff und 90 w-% bzw. 70 w-% PP hergestellte Box

Die Bauteilkosten wurden analog zum Beispiel „Fassadenverkleidung“ abgeschätzt (siehe Abbildung 12.9 im Anhang) und belaufen sich bei 30 w-% Füllstoffgehalt auf ca. 1,49 €. Im Unterschied zur Fassadenverkleidung wird kein Material für den

Anguss berechnet. Dafür wurden die Werkzeugkosten auf 25.000 € erhöht, da ein Heißkanalwerkzeug wesentlich teuer und komplexer ist, als ein Spritzgusswerkzeug mit Anguss. Die Materialkosten wurden außerdem an das geänderte Mischungsverhältnis angepasst. Aufgrund der im Vergleich hohen Anlagen- und Betriebskosten haben die Materialkosten jedoch nur eine untergeordnete Bedeutung.

Anhand der drei genannten Beispiele konnte gezeigt werden, dass es verschiedene Einsatzfelder für Spuckstoff-Compounds gibt. Die z.T. hohe Wasseraufnahme und die geringe Schimmelpilzresistenz führen hierbei zu Einschränkungen. Die Zugeigenschaften liegen bei beiden Matrixsystemen im Bereich der ungefüllten Materialien. Auch wenn die Steifigkeit durch Zugabe des Spuckstoffes erhöht wird, sollte aufgrund der z.T. geringeren Zugfestigkeit vom Einsatz in strukturell belasteten Bauteilen abgesehen werden. Die deutlich reduzierte Schlagzähigkeit schließt zudem die Anwendung in schlagbeanspruchten Bauteilen aus.

Die erfassten thermischen Eigenschaften, sowie die Produktion eines Beispielbauteils zeigen, dass die gefüllten Compounds mit ähnlichen Prozessparametern verarbeitbar sind, wie die ungefüllten Systeme. Bei höheren Füllstoffgehalten bietet sich eine Erhöhung der Schmelztemperatur oder des Einspritzdruckes an, um geeignete Viskositäten zu erreichen. Dabei sollte eine Verarbeitungstemperatur von 250 °C nicht oder wenn nur kurzfristig überschritten werden.

Daraus lässt sich schließen, dass weitaus mehr, als die drei genannten Anwendungen für den Einsatz der Spuckstoff-Compounds denkbar sind. Die Kostenbetrachtung konnte zeigen, dass diese Produkte auch finanziell gesehen konkurrenzfähig und attraktiv sind. Potentielle Nachteile gegenüber ungefüllten Kunststoffen, wie der Geruch und die Optik der Compounds, sind subjektiv und könnten auch als Vorteil vermarktet werden. Gerade das strukturierte, inhomogene Gefüge und die bräunliche Farbe

zeigen, dass es sich um Produkte aus recyceltem Material handelt. Konsumenten, denen Nachhaltigkeit wichtig ist, würden somit in ihrer Kaufentscheidung bestärkt. Eine Kombination mit recycelten Kunststoffen (siehe Kapitel 6.2) würde diesen Anreiz noch intensivieren.

6.2 Kombination von Spuckstoff und Recyclingkunststoff

Da im vorherigen Kapitel gezeigt werden konnte, dass eine Kombination aus Spuckstoff und neuen Kunststoffen in gewissen Anwendungen praxistauglich ist, wird nun überprüft, ob auch Recyclingkunststoffe als Matrixsysteme für die neuartigen Spuckstoff-compounds geeignet sind. Die Vorgehensweise entspricht dabei der aus Kapitel 6.1. An geeigneter Stelle werden die Ergebnisse der Neumaterialien herangezogen, um eine Einordnung der bestimmten Eigenschaften zu ermöglichen.

6.2.1 Ausgangsmaterial

Als Ausgangsmaterial für die in diesem Kapitel behandelten Versuchsreihen wurden drei verschiedene Recycling-Polypropylene und ein Recycling-Polyamid verwendet, die im Folgenden vorgestellt werden. Die zugehörigen Materialkennwerte sind, soweit vom Hersteller angegeben, in Tabelle 6.9 im Vergleich mit den Neumaterialien dargestellt. Als Füllstoff wurde wie bereits in Kapitel 6.1 der getrocknete und zerkleinerte Spuckstoff genutzt.

Recycling-Polypropylen rPP roh:

Bei diesem Recycling-Polypropylen handelt es sich um Material aus gebrauchten, geschredderten Batteriekästen, welches von der C2P Germany GmbH zur Verfügung gestellt wurde. Das Material ist nicht compoundiert, extrudiert oder mit Additiven versetzt. Für das Material liegt kein Datenblatt vor.

Recycling-Polypropylen Cepylen 8103N:

Das Recycling-PP Cepylen 8103N (im Folgenden rPP 8103N) ist ein von der C2P Germany GmbH aus alten Batteriekästen hergestelltes Compound. Zur Eigenschaftssteigerung wurden dem „rohen“ Recycling-PP Additive zugesetzt, die das Material wärmealterungsbeständig machen und die Schlagzähigkeit erhöhen.

Recycling-Polypropylen Ceylen 8T223N:

Wie auch die anderen beiden Recycling-Polypropylene wurde das Ceylen 8T223N (im Folgenden rPP 8T223N) von der C2P Germany GmbH zur Verfügung gestellt. Dem rPP 8T223N sind wiederum Additive zur Schlagzähigkeitserhöhung zugesetzt. Im Unterschied zu den anderen beiden PPs enthält es jedoch ca. 22 % Talkum als mineralischen Füllstoff. Dieser Füllstoffgehalt wird bei der Behandlung der Eigenschaften nicht eingerechnet. Die Angabe „Füllstoffgehalt“ bezieht sich somit immer nur auf den Spuckstoff.

Recycling-Polyamid:

Bei dem Recycling-Polyamid (rPA) handelt es sich um ein PA-6-Rezyklat aus Kletterseilen der Edelrid GmbH & Co. KG. Die in Tabelle 6.9 dargestellten Werte wurden von SELMA LOHAN im Rahmen ihrer Masterarbeit bestimmt [99]. Das Rezyklat ist aktuell noch nicht auf dem Markt erhältlich.

Tabelle 6.9: Materialkennwerte der Recyclingkunststoffe nach [80, 99, 100, 101] und eigenen Messwerten aus Kapitel 6.1.3

Kenngröße	Geprüft nach	rPP 8103N	rPP 8T223N	rPA	PP	PA
MFI (230 °C, 2,16 kg)	ISO 1133	8 ± 1 g/10 min	8 ± 1 g/10 min	-	52 g/10 min	-
Dichte	ISO 1183-1	0,92 ± 0,02 g/cm³	1,06 ± 0,02 g/cm³	1,1 g/cm³	0,9 g/cm³	-
Streckspannung	ISO 527	22 + 2/ - 1 MPa	≥ 19 MPa	48,9 MPa	-	-
Zugfestigkeit	ISO 527	≥ 14 MPa	-	58,2 MPa	37 MPa	48 MPa
Elastizitätsmodul	ISO 178	≥ 950 MPa	≥ 1450 MPa	2500 MPa	1380 MPa	1808 MPa
Izod-Kerbschlagzähigkeit	ISO 180/A	≥ 6 kJ/m² (23 °C) ≥ 4 kJ/m² (-18 °C)	≥ 3,8 kJ/m² (23 °C)	-	-	-
SHORE-Härte D	ISO 868	≥ 58 D	≥ 63 D	-	-	-
Füllstoffgehalt	ISO 3451-1	0 %	22 ± 2 %	0 %	0 %	0 %
Glasübergangstemperatur	ISO 11357	-	-	31 °C	-	-
Erweichungstemperatur	ISO 11357	-	-	170 °C	-	-
Schmelztemperatur	ISO 11357	-	-	222 °C	163 °C	220 °C
Zersetzungstemperatur	ISO 11358	-	-	430 °C	325 °C	430 °C
Kristallinität	ISO 11357	-	-	24 %	-	-

6.2.2 Verarbeitung

Die Verarbeitung des Spuckstoffs und der Recyclingkunststoffe zu Compounds erfolgte analog zu der in Kapitel 6.1.2 vorgestellten Verarbeitung der neuen Kunststoffe. Die Compoundiertemperatur für die Polypropylene lag bei 185 °C. Das Recycling-PA wurde bei 220 °C mit dem Spuckstoff vermengt. Die Temperaturprofile für den Spritzgussprozess sind in Tabelle 6.10 dargestellt.

Tabelle 6.10: Für den Spritzgussprozess eingestellte Temperaturprofile

Matrix-system	Tempera- tur Zone 1 (Einzug) in °C	Tempera- tur Zone 2 in °C	Tempera- tur Zone 3 in °C	Tempera- tur Zone 4 (Düse) in °C
rPP 8103N	180	190	190	200
rPP roh	180	190	190	200
rPP 8T223N	180	190	190	200
rPA	220	230	230	240

6.2.3 Eigenschaften der Compounds

6.2.3.1 Mechanische Eigenschaften

6.2.3.1.1 Zugeigenschaften

Die Elastizitätsmoduln der Compounds aus Spuckstoff und den Recycling-PPs (rPPs) bzw. dem Recycling-PA (rPA) sind in Abbildung 6.37 dargestellt.

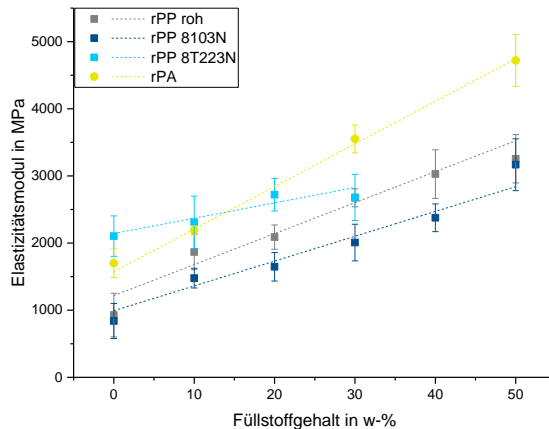


Abbildung 6.37: Elastizitätsmodul der Compounds mit rPP und rPA in Abhängigkeit vom Füllstoffgehalt

Es ist zu erkennen, dass wie bei den Neumaterialien der Elastizitätsmodul mit steigendem Füllstoffgehalt linear zunimmt. Die Versteifungswirkung des Spuckstoffes ist bei dem Polyamid aufgrund der Faser-Matrix-Haftung erneut ausgeprägter, als bei den Polypropylensystemen, jedoch nicht so markant, wie beim Neumaterial.

Die rPPs zeigen untereinander ein differenziertes Verhalten. Die Compounds des rPP roh sind über alle Füllstoffgehalte steifer, als die des rPP 8103N. Durch die Additive (z.B. Weichmacher, Stabilisatoren), die diese beiden Materialien voneinander unterscheiden, wird die Steifigkeit des Materials reduziert, um dafür andere Eigenschaften, wie die Verarbeitbarkeit und die Langzeitstabilität zu verbessern.

Auffällig ist, dass die Versteifung beim rPP 8T223N gering ausfällt. Dieses Matrixsystem ist mit Talkum gefüllt, sodass der Elastizitätsmodul bei 0 w-% Spuckstoffanteil bereits höher ist, als bei den anderen Matrixsystemen. Unter der Annahme, dass das Talkum und der Spuckstoff nicht wechselwirken, die beiden Füllstoffe aber beide mit der Matrix intermolekulare Wechselwirkungen aufbauen, ist durch das Talkum bereits bei geringen Spuckstoffanteilen ein Teil der Matrix gebunden. Die zwischen Spuckstoff und Matrix entstehenden Wechselwirkungen sind in Summe geringer und können auch durch eine Erhöhung des Spuckstoffanteils nicht so sehr gesteigert werden, wie bei den ungefüllten Matrixsystemen.

Die Zugfestigkeiten der Compounds aus den Recyclingmaterialien sind in Abbildung 6.38 dargestellt. Wie bereits bei den Neumaterialien, ist zu sehen, dass das Polyamid durch den Spuckstoff verstärkt wird und gut mit ihm kompatibel ist. Die Compounds mit den rPPs verspröden mit steigendem Füllstoffgehalt, da die Wechselwirkung zwischen Matrix und Füllstoff nicht optimal ist. Im Gegensatz zum Verhalten beim Elastizitätsmodul sind bei den Zugfestigkeiten der rPPs kaum Unterschiede festzustellen.

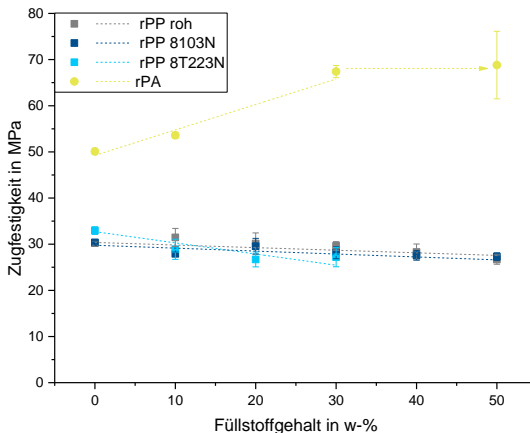


Abbildung 6.38: Zugfestigkeit der Compounds mit rPP und rPA in Abhängigkeit vom Füllstoffgehalt

Da für einen späteren Anwendungsfall und die folgende Kostenabschätzung interessant ist, wie sich die Recycling-Compounds im Vergleich mit den Compounds auf Basis von Neumaterial verhalten, sind in Abbildung 6.39 der Elastizitätsmodul und die Zugfestigkeit dieser Materialien gegeneinander aufgetragen. Auf der Ordinate sind dabei die Werte für die Recyclingmaterialien und auf der Abszisse die Werte der Neukunststoffe aufgetragen. Die eingezeichnete Diagonale dient zur Orientierung. Punkte unterhalb dieser Linie bedeuten, dass das Neumaterial bessere Eigenschaften besitzt, Werte oberhalb zeigen eine Steifigkeit bzw. Festigkeit des Recyclingmaterials an.

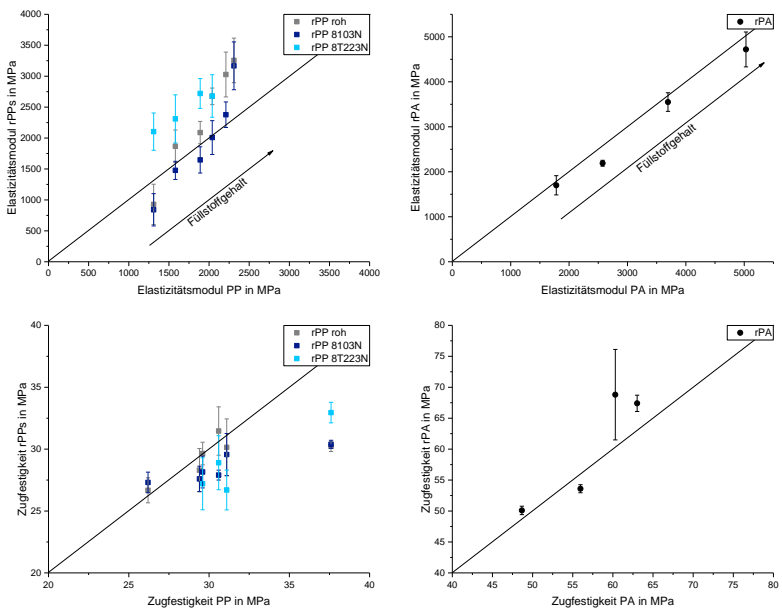


Abbildung 6.39: Elastizitätsmodul und Zugfestigkeit der Recycling-Compounds in Vergleich mit Neumaterial-Compounds

Bei den Polypropylenen besitzen das rPP roh und das talkumgefüllte rPP 8T223N einen höheren Elastizitätsmodul. Das rPP 8103N ist bei niedrigeren Füllstoffgehalten etwas weniger steif als das Neumaterial,

da es durch die verwendeten Additive weich gemacht wird. Die Zugfestigkeit ist beim ungefüllten PP-Neumaterial höher als bei den entsprechenden Rezyklaten. Das rPA besitzt einen etwas geringeren Elastizitätsmodul und zum Teil höhere Zugfestigkeiten als das PA.

Beim durchgeführten Vergleich von Recycling- und Neumaterial ist zu beachten, dass es sich bei dem Recyclingmaterial nicht um ein Rezyklat des Neumaterials handelt, sondern um Produktionsausschüsse (rPA) bzw. zerkleinerte und z.T. aufbereitete End-of-life-Bauteile unterschiedlicher Hersteller (rPP). Eine Erläuterung der dargestellten Unterschiede könnte daher nur nach umfangreichen Untersuchungen z.B. hinsichtlich der Molekülstruktur, Molmassenverteilung und der in der Herstellung zugesetzten Additive durchgeführt werden. Für das Ziel der Evaluation der Materialeigenschaften sowie einer geeigneten Anwendung für die Compounds hätten diese Untersuchungen nur einen geringen Mehrwert.

6.2.3.1.2 CHARPY-Schlagzähigkeit

Die CHARPY-Schlagzähigkeiten der Compounds sind in Abbildung 6.40 dargestellt.

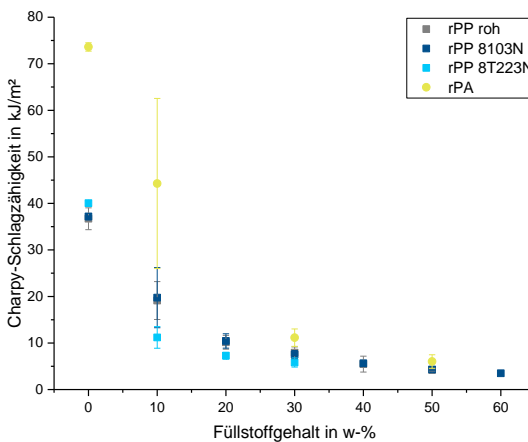


Abbildung 6.40: CHARPY-Schlagzähigkeit der Compounds mit rPP und rPA in Abhängigkeit vom Füllstoffgehalt

Wie bereits bei den Neumaterialien festgestellt, besitzen die reinen Matrixsysteme die höchste Schlagzähigkeit und brechen bei den gewählten Versuchsbedingungen nicht bzw. nicht vollständig. Durch das Einbringen des Spuckstoffes nimmt die absorbierbare Schlagenergie drastisch ab und es tritt Spröbruch auf.

Bemerkenswert ist in diesem Zusammenhang, dass das mit Talkum gefüllte rPP 8T223N mit 0 w-% Spuckstoffanteil eine höhere Schlagzähigkeit besitzt, als die anderen rPPs. Das Talkum wirkt sich im Gegensatz zum Spuckstoff nicht negativ auf die Schlagzähigkeit aus sondern führt weiterhin zu einem duktilen Verhalten.

Die genauen Wirkweisen, die zu dieser für gefüllte Kunststoffe hohen Schlagzähigkeit führt, wurden u.a. von MCGENITY et al. [102], SCHÖNE et al. [103] und AMMAR et al. [104] untersucht, wobei dieser Effekt nicht immer und im gleichen Maße beobachtet werden konnte. Entscheidend sind hierbei u.a. die Größe des Talkums, die gleichmäßige Verteilung in der Matrix und die Ausrichtung der plättchenförmigen Partikel. Bei spritzgegossenen Probekörpern liegen die Talkumplättchen senkrecht zur Schlagrichtung [105] und können daher die Schlagenergie aufnehmen und Risse stoppen, sodass die Schlagzähigkeit erhöht wird [106]. In Kombination mit dem Spuckstoff wird die Anzahl an Grenzflächen im Compound so stark erhöht, dass die Energieabsorption nicht mehr möglich ist, sodass die Schlagzähigkeit der mit Talkum gefüllten Compounds unter die der anderen rPPs sinkt.

Im Vergleich der Recyclingmaterialien untereinander besitzen das rPA und die daraus hergestellten Compounds die höchsten Schlagzähigkeiten.

Zum Vergleich sind in Abbildung 6.41 die Schlagzähigkeiten der Recyclingmaterialien getrennt nach Polymerart gegen die Schlagzähigkeiten der Neumaterialien aufgetragen. Die PP-Compounds besitzen dabei eine geringere Schlagzähigkeit als die rPPs. Das rPA ist bei 0 w-% und 10 w-% schlagzäher, als das PA. Bei 30 w-% und 50 w-% sind die Werte der beiden Polyamide nahezu

identisch. Bei beiden Polymerarten sind somit die recycelten Materialien die Neumaterialien geringfügig überlegen.

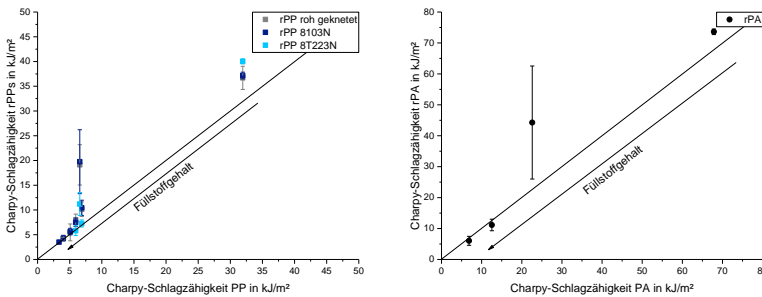


Abbildung 6.41: CHARPY-Schlagzähigkeit der Neumaterialien und der Recyclingmaterialien im Vergleich

6.2.3.2 Thermische Eigenschaften

6.2.3.2.1 Schmelz- und Kristallisationsverhalten

Aus den durchgeführten DSC-Messungen konnten die Schmelztemperaturen und –enthalpien der Compounds bestimmt werden. Eine Auftragung gegen den Füllstoffgehalt ergibt die in Abbildung 6.42 und Abbildung 6.43 dargestellten Grafiken.

Für keines der Matrixsysteme ändern sich die Schmelztemperaturen durch Zugabe des Füllstoffes. Die Schmelztemperaturen sind beinahe identisch mit denen der neuen Kunststoffe (PP: ca. 165 °C; PA: ca. 220 °C).

Die Schmelzenthalpien nehmen mit steigendem Füllstoffgehalt ab. Durch Normierung auf den Kunststoffanteil im Compound (siehe Abbildung 6.43 rechte Seite) kann gezeigt werden, dass durch Zugabe des Spuckstoffes die Schmelzenthalpie und damit der Kristallisationsgrad im Rahmen der Messgenauigkeit konstant bleiben.

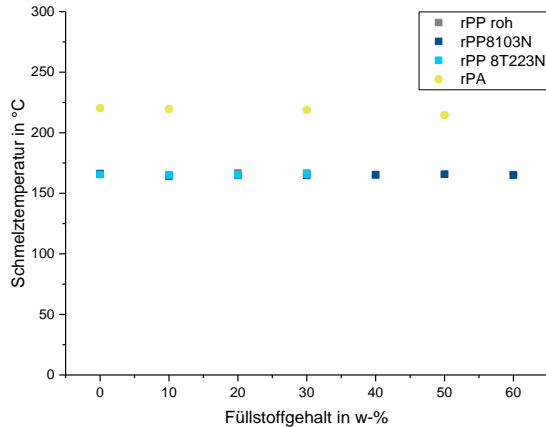


Abbildung 6.42: Schmelztemperatur der Compounds aus rPP und rPA in Abhängigkeit des Füllstoffgehaltes

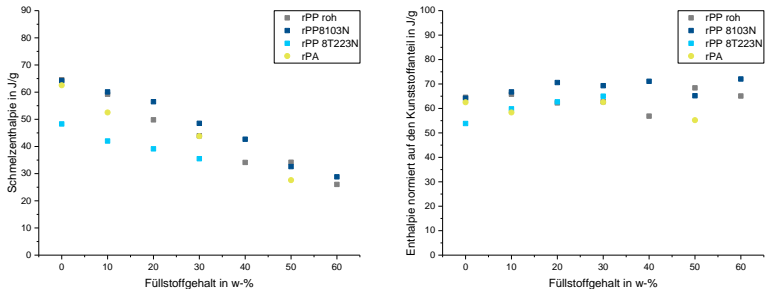


Abbildung 6.43 Schmelzenthalpie (links) und auf den Kunststoffgehalt normierte Schmelzenthalpie (rechts) der Compounds aus rPP und rPA in Abhängigkeit des Füllstoffgehaltes

Besonderes Augenmerk ist an dieser Stelle auf das rPP 8T223N zu legen. Durch die Talkumfüllung ist der gesamte Füllstoffgehalt im Compound höher und somit der Kunststoffgehalt niedriger. Neben dem Spuckstoff, liegt hier auch Talkum als potentieller Kristallisationskeim vor. Die Kombination dieser beiden Füllstoffe führt zu

einer linearen Zunahme der normierten Schmelzenthalpie mit steigendem Füllstoffgehalt.

6.2.3.2.2 Thermische Zersetzung

Die TGA-Kurven der Recyclingkunststoffe sind in Abbildung 6.44 dargestellt. Ohne Zugabe des Spuckstoffes sind die rPP-Systeme bis ca. 300 °C thermisch stabil. Das rPA beginnt erst oberhalb von 400 °C mit der Zersetzung. Beim rPP 8T223N verbleibt ein deutlicher Rückstand von ca. 30 w-%, der durch die Talkumfüllung begründet ist. Talkum als Magnesiumsilikathydrat ($\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$) gibt das in seine Kristallstruktur eingebaute Wasser erst oberhalb von 800 °C ab und zersetzt sich somit im betrachteten Temperaturbereich nicht [107].

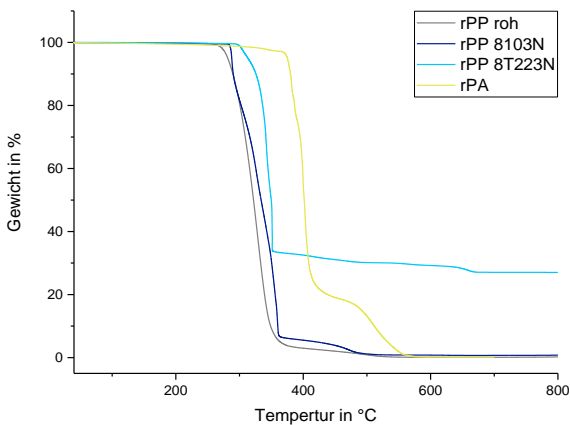


Abbildung 6.44: TGA-Kurven der Recyclingkunststoffe ohne Spuckstoff

Da sich die drei rPPs in ihrer thermischen Zersetzung bis auf den verbleibenden Rückstand aus Talkum ähneln, sind in Abbildung 6.45 beispielsweise die TGA-Kurven verschiedener Mischungen aus rPP roh und Spuckstoff dargestellt. Durch Zugabe des Spuckstoffes wird die erste Zersetzungsstufe leicht zu geringeren Temperaturen verschoben. Das verbleibende Gewicht nach dieser Stufe, sowie der

Rückstand am Ende der Messung erhöhen sich jedoch mit steigendem Spuckstoffanteil.

Wie bereits beim PP Neumaterial ist eine eindeutige Zuordnung der Zersetzungsstufen nicht möglich, da sich die Zersetzung des Matrixmaterials und des Spuckstoffes überlagern. Die Verschiebung des Beginns der ersten Stufe zeigt, dass der Spuckstoff die thermische Stabilität geringfügig reduziert. Für die Verarbeitung ist dies nicht kritisch, da die Zersetzung stets oberhalb von 250 °C beginnt. Die Zunahme des Rückstands resultiert aus in diesem Temperaturbereich stabilen Komponenten des Spuckstoffes wie anorganischen Füllstoffen aus dem Papier oder Fremdkörpern wie Aluminium oder Glas, deren Anteil im Compound proportional mit dem Spuckstoffanteil zunimmt. Darüber hinaus steigt auch der Aschegehalt mit steigendem Anteil Spuckstoff.

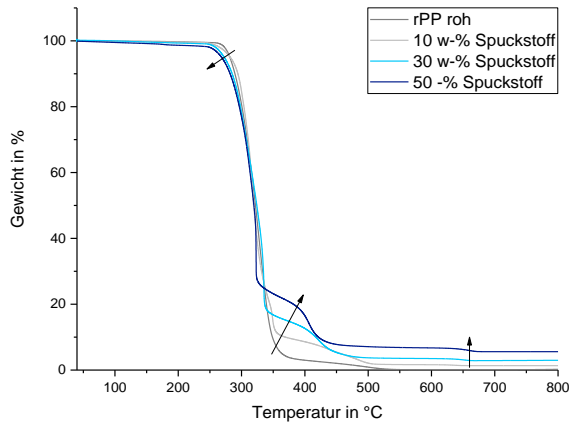


Abbildung 6.45: TGA-Kurven der Compounds mit rPP roh

Bei den Compounds aus rPA und Spuckstoff (siehe Abbildung 6.46) sind dieselben Trends zu sehen, wie bereits beim PA in Kapitel 6.1.3.2.2. Durch Zugabe des Spuckstoffes wird die erste Zersetzung deutlich zu niedrigeren Temperaturen verschoben, da sich erstens der Spuckstoff früher zersetzt als das rPA und zweitens die bei dieser Zersetzung entstehenden Abbauprodukte die Kettenspaltung des rPA

beschleunigen. Daraus resultiert die Einschränkung, dass die Verarbeitung der Compounds bis maximal 300 °C ohne thermische Zersetzung möglich ist.

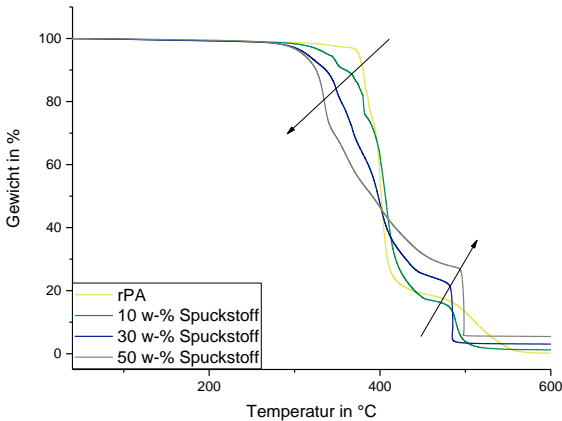


Abbildung 6.46: TGA-Kurven der Compounds mit rPA

6.2.3.2.3 Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeiten der Compounds aus rPP und rPA sind in Abbildung 6.47 dargestellt.

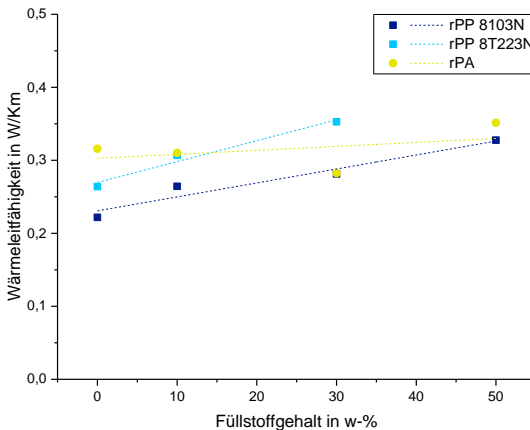


Abbildung 6.47: Wärmeleitfähigkeit der Compounds aus rPP und rPA in Abhängigkeit des Füllstoffgehaltes bei 50 °C

Wie bereits bei den Neumaterialien, liegen die Werte zwischen 0,2 W/K·m und 0,4 W/K·m (grafischer Vergleich siehe Abbildung 12.4 und Abbildung 12.5. im Anhang). Zwischen den beiden Messtemperaturen 50 °C und 100 °C ist erneut kein signifikanter Unterschied zu erkennen, sodass zur Übersichtlichkeit nur die Werte bei 50 °C dargestellt wurden. Bei den rPPs steigt die Wärmeleitfähigkeit mit dem Füllstoffgehalt an. Die höchste Leitfähigkeit besitzt dabei das rPP 8T223N, da die Talkum-Komponente die Wärmeleitung fördert. Das rPA und die daraus hergestellten Compounds zeigen eine fast konstante Wärmeleitfähigkeit um 0,3 W/K·m.

6.2.3.2.4 Fließverhalten

Wie bereits bei den Neumaterialien, wurden auch das Fließverhalten der Recyclingmaterialien mittels Rotationsrheometer und Fließweglängenmessung an Fließspiralen untersucht. Die Viskositätskurven der Rheometermessungen der vier Matrixsysteme sind in Abbildung 12.10 bis Abbildung 12.13 im Anhang dargestellt. Aus diesen Kurven wurde zum besseren Vergleich der verschiedenen Materialien und Füllstoffgehalte die Viskosität bei 100 rad/s bestimmt und in Abbildung 6.48 grafisch dargestellt.

Bei allen vier Recyclingmaterialien steigt die Viskosität mit dem Füllstoffgehalt an. Eine Schergeschwindigkeitsüberhöhung und die damit einhergehende Reduzierung der gemessenen Viskosität bei 10 w-% Spuckstoffanteil kann diesmal nicht registriert werden.

Ein Vergleich der ungefüllten Neu- und Recyclingmaterialien ist in Abbildung 12.16 im Anhang dargestellt. Das neue PP besitzt insgesamt die geringste Viskosität, da es insbesondere für dünnwandige Anwendungen hergestellt wird. Die Recycling-PPs sind viskoser als das Neumaterial und besitzen eher Viskositäten im Bereich der beiden Polyamide.

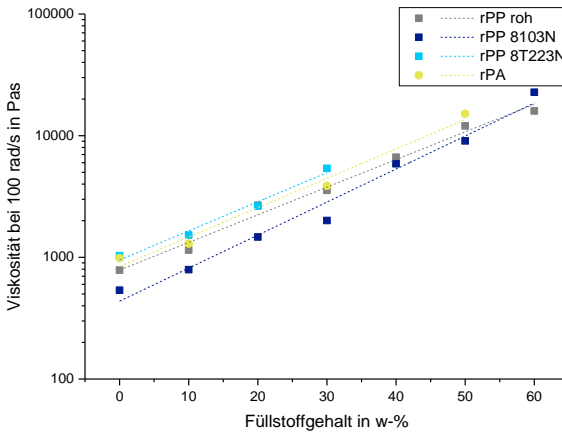


Abbildung 6.48: Viskositäten der Compounds aus Spuckstoff und den Recyclingkunststoffen bei einer Winkelfrequenz von 100 rad/s

Die Fließweglängen der Compounds mit Recyclingmaterial sind in Abbildung 6.49 farblich in Abhängigkeit des Füllstoffgehaltes und des Einspritzdruckes dargestellt. Die eingezeichneten Pfeile indizieren die erkennbaren Trends von kleinen zu großen Fließweglängen. Für alle vier Diagramme wurde dieselbe Skalierung gewählt, um den Vergleich der verschiedenen Materialien zu ermöglichen.

Für die drei rPPs ist eine Abnahme der Fließweglänge mit steigendem Füllstoffgehalt und sinkendem Einspritzdruck zu erkennen. Die absoluten Werte sind für das rPP roh und das rPP 8103N nahezu identisch. Das talkumgefüllte rPP 8T223N zeigt höhere Fließweglängen, aufgrund des insgesamt höheren Füllstoffgehalts.

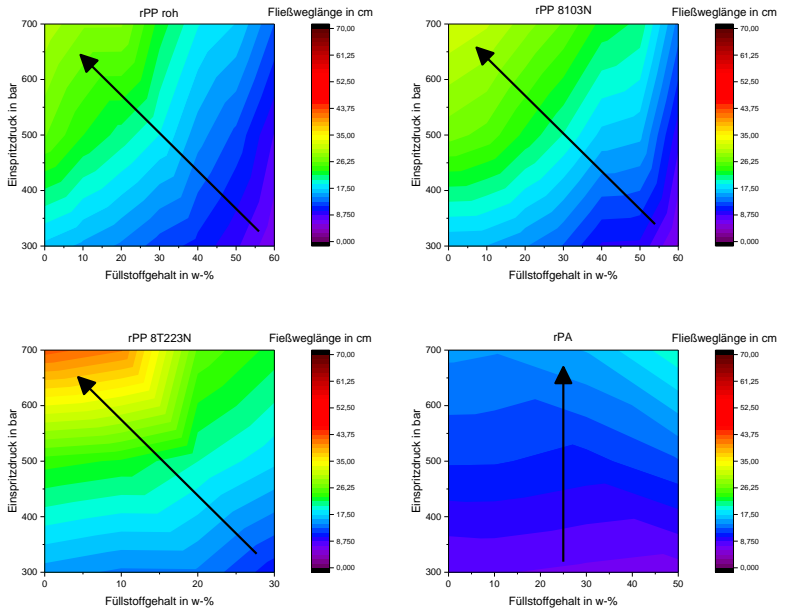


Abbildung 6.49: Fließweglänge der Compounds mit rPP und rPA

Im Vergleich mit den rPPs sind die Fließweglängen des rPA deutlich geringer. Außerdem sieht es so aus als beeinflusse lediglich der Einspritzdruck die Fließweglänge signifikant. Dies steht entgegen den Rheometermessungen (Abbildung 6.48), die deutlich zeigen, dass ein höherer Füllstoffgehalt eine höhere Viskosität impliziert.

Eine andere Art der Auftragung der Messdaten in Abbildung 6.50 zeigt deutlicher, dass auch bei den Fließweglängen des rPA eine Füllstoffabhängigkeit auftritt, die in der vorherigen Darstellung in Abbildung 6.49 nicht zu erkennen war. Die Fließweglänge steigt von 0 w-% Füllstoff auf 10 w-% Füllstoff durch die Schergeschwindigkeitsüberhöhung an. Danach sinkt sie bis 50 w-% wieder bis auf das Niveau des ungefüllten rPA ab.

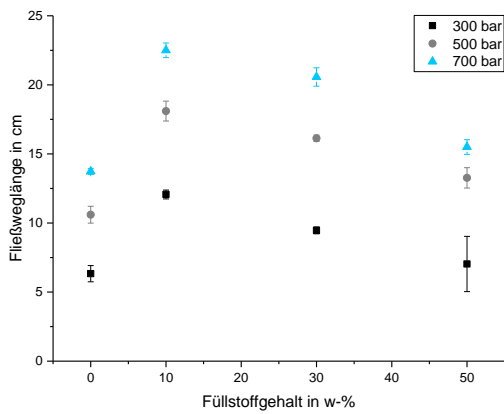


Abbildung 6.50: Fließweglänge der Compounds mit rPA in Abhängigkeit vom Füllstoffgehalt bei verschiedenen Einspritzdrücken

6.2.3.3 Sonstige Eigenschaften

6.2.3.3.1 Wasseraufnahme

Die prozentuale Wasseraufnahme der Proben mit Recyclingkunststoff nach 2,5 h in siedendem Wasser ist in Abbildung 6.51 und Abbildung 6.52 jeweils im Vergleich mit dem Neumaterial dargestellt.

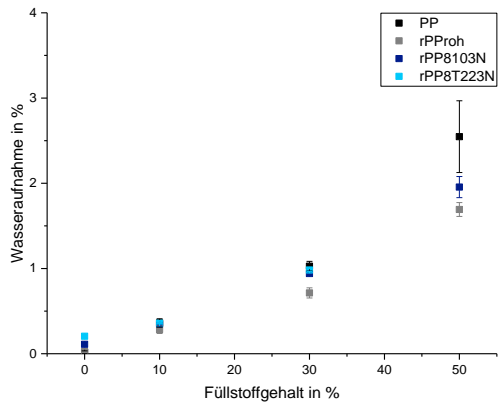


Abbildung 6.51: Wasseraufnahme der Compounds mit Recycling-PP im Vergleich mit neuem PP

Wie bereits beim neuen PP festgestellt, steigt bei den Recycling-PPs mit steigendem Füllstoffgehalt auch die Wasseraufnahme an. Der direkte Vergleich zeigt, dass bis 30 w % kein Unterschied zwischen Neumaterial und Recyclingmaterial besteht. Bei 50 w % Spuckstoff nimmt das Neumaterial mehr Wasser auf, als die Recyclingmaterialien.

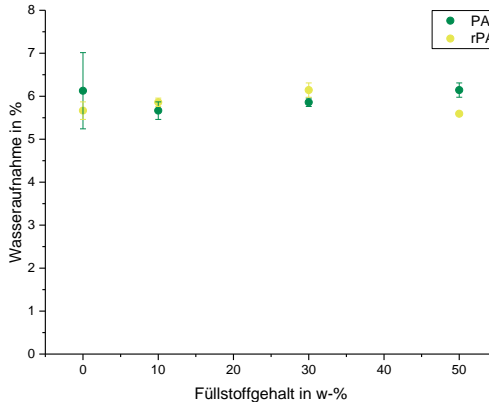


Abbildung 6.52: Wasseraufnahme der Compounds mit Recycling-PA im Vergleich mit neuem PA

Bei rPA ist die Wasseraufnahme, wie beim PA, unabhängig vom Füllstoffgehalt. Das rPA ist aufgrund seiner chemischen Struktur hydrophil, sodass die Zugabe des hydrophilen Spuckstoffs keine Erhöhung der Wasseraufnahme bewirkt. Die Wasseraufnahme ist mit ca. 6 % nahezu identisch mit der des PA.

6.2.3.3.2 Schimmelpilzresistenz

Für die Untersuchungen der Resistenz gegenüber Schimmelpilzen wurden bei den Recyclingmaterialien aufgrund des kostspieligen Testverfahrens lediglich Compounds mit rPP 8103N, rPP 8T223N und rPA mit 30 w-% Spuckstoff untersucht. Die Bewertung der Proben nach ein, zwei und vier Wochen sind in Abbildung 6.53 dargestellt. Die nicht schraffierten Balken stehen dabei für Verfahren A und die schraffierten Balken für Verfahren B.

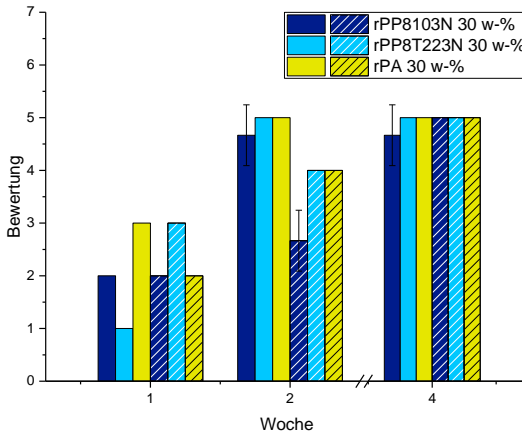


Abbildung 6.53: Bewertung des Schimmelbewuchses der Compounds mit Recyclingmaterial und 30 w-% Füllstoff (Verfahren A unschraffiert, Verfahren B schraffiert)

Bei Verfahren A zeigt die Probe mit rPA über alle Wochen das schlechteste Ergebnis. Die gute Wasseraufnahme aufgrund der hydrophilen chemischen Struktur des rPA begünstigt das Pilzwachstum. Das talkumgefüllte rPP 8T223N zeigt nach einer Woche kaum Schimmelwachstum, erreicht nach zwei Wochen im Brutschrank jedoch schon die Maximalbewertung. Auf dem rPP 8103N wächst in diesem Verfahren so wenig Schimmel, dass selbst nach vier Wochen noch eine der Proben mit einer „4“ bewertet wurde.

Die Bewertungen aus Verfahren B zeigen ein etwas anderes Bild. Durch die Zugabe der Glukose wird das Pilzwachstum auf dem rPA in den ersten zwei Wochen gegenüber Verfahren A gehemmt. Das rPP 8T223N hingegen schimmelt zumindest in der ersten Woche signifikant mehr. Nach Ablauf der vierwöchigen Testzeit sind, wie bereits bei den Neumaterialien, alle Proben mit Schimmel bewachsen. Die Recyclingkunststoffe zeigen somit ebenfalls kein fungizides Verhalten, sodass bei ihrer Kombination mit dem Spuckstoff in der Anwendung in warmen und feuchten Umgebungen mit Schimmelbildung zu rechnen ist.

6.2.4 Kostenabschätzung und Anwendungsbeurteilung

Die Kosten für Compounds aus Recyclingkunststoffen und Spuckstoff setzen sich, wie bereits in Kapitel 6.1.4 diskutiert, aus den Materialkosten und Prozesskosten für Compoundierung und Weiterverarbeitung zu einem Bauteil zusammen. Da sich an der Vorbehandlung des Spuckstoffes nichts ändert, kann hierfür wieder der berechnete Preis von 350 €/t verwendet werden.

Die Materialkosten für die Kunststoffe sind in Tabelle 6.11 dargestellt. Für das rPP roh und das rPA wurden wieder durchschnittliche Marktpreise verwendet, da das rPP roh im uncompoundierten Zustand nicht verkauft wird und das rPA bisher noch nicht auf dem Markt erhältlich ist. Zum Vergleich sind außerdem erneut die Preise für die beide Neumaterialien erfasst.

Tabelle 6.11: Preise für die Recyclingkunststoffe (* nach [90];** nach [91])

Material	Preis in €/t	Differenz zum Neumaterial in €/t
PP	960	0
rPP roh*	560	400
rPP 8103N**	950	10
rPP 8T223N**	1100	-140
PA**	2080	0
rPA	1000	1080

Die Compoundierung der Materialien kann wieder mit 280 €/t veranschlagt werden. In Abhängigkeit des Füllstoffgehaltes ergeben sich somit die in Abbildung 6.54 dargestellten Preise. Die gestrichelten Linien zeigen dabei den Preis für den jeweiligen ungefüllten Recyclingkunststoff an. Beim rPP roh ist ein Sonderfall zu beachten: Da es sich hier um ein Mahlgut aus Batteriekästen handelt, dass im Spritzguss nicht direkt einsetzbar ist, werden auch auf das ungefüllte Material 280 €/t Compoundierkosten aufgeschlagen. Die

gepunktete Linie zeigt die Materialkosten ohne Compoundierung, die gestrichelte Linie die Kosten inklusive Compoundierung an.

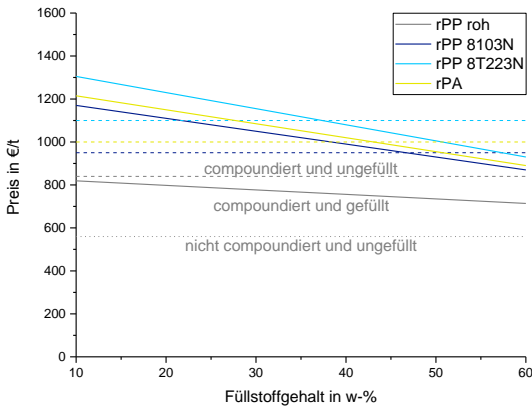


Abbildung 6.54: Preise der Compounds aus Spuckstoff und Recyclingkunststoffen in Abhängigkeit des Füllstoffgehaltes

Aufgrund der unterschiedlichen Ausgangspreise der Recyclingkunststoffe bringt die Substitution mit Spuckstoff bei unterschiedlichen Füllstoffgehalten eine Kostenersparnis mit sich. Dadurch dass das rPP roh für eine Verarbeitung im Spritzguss in allen Fällen compoundiert werden muss, ist der Einsatz von Spuckstoff als Substitutionsmaterial immer preiswerter als die Verwendung des ungefüllten rPP roh. Die minimal notwendigen Füllstoffgehalte liegen beim rPP 8103N, dem rPP 8T223N und dem rPA bei ca. 47 w-%, 37 w-% und 43 w-%.

Als Anwendungen werden erneut die in Kapitel 6.1.4 vorgestellten Beispiele betrachtet. In den Untersuchungen der Eigenschaften der Compounds aus Spuckstoff und Recyclingkunststoffen konnten keine signifikanten Abweichungen zu den Ergebnissen der Neumaterialien festgestellt werden. Zum Teil werden sogar höhere mechanische Kennwerte erreicht. Die thermischen und sonstigen Eigenschaften sind nahezu identisch mit denen der Neumaterialien. Es kann aus

dem Eigenschaftsprofil somit abgeleitet werden, dass ein Einsatz in den für die Neumaterialien identifizierten Anwendungen möglich ist. Daraus folgt, dass sich lediglich die Kosten für die vorgestellten Anwendungen ändern. In Tabelle 6.12 sind die Kosten für ein Fassadenverkleidungselement und eine Aufbewahrungsbox aus Compounds mit den unterschiedlichen Matrixsystemen inklusive der Neumaterialien dargestellt. Es wurde sich dabei beispielhaft auf Compounds mit 40 w-% Füllstoffgehalt beschränkt. Zur Berechnung wurde erneut die freizugängliche Berechnungstabelle [93] mit den in Kapitel 6.1.4 genannten und im Anhang hinterlegten Prozessparameter genutzt. Einzig die Materialkosten wurden variiert.

Tabelle 6.12: Bauteilkosten für ein Fassadenverkleidungselement und eine Aufbewahrungsbox aus Compounds mit 40 w-% Spuckstoffanteil

Material	Kosten in €/Stück	
	Fassadenverkleidung	Aufbewahrungsbox
rPP roh	1,37	1,46
rPP 8103N	1,40	1,48
rPP 8T223N	1,42	1,49
PP	1,40	1,48
rPA	1,41	1,49
PA	1,50	1,56

Es ist zu sehen, dass die Stückkosten nur um wenige Cent schwanken. Der größte Teil der Bauteilkosten wird durch die Prozesskosten und nicht durch das Material an sich bestimmt. Aus diesem Grund ist es notwendig, die Spuckstoff-Compounds mit industriell verwendeten Compounds zu vergleichen und die zur Herstellung benötigten Kosten gegenüberzustellen. Die Erfassung der Materialeigenschaften solcher Referenzmaterialien erfolgt im nächsten Kapitel. Der Vergleich der Materialien ist in Kapitel 8 zu finden.

6.3 Referenzmaterialien

6.3.1 Ausgangsmaterialien

Da der Spuckstoff hauptsächlich aus lignocellulosischen Fasern besteht, wurden als Referenzmaterialien kommerziell erhältliche Compounds mit Naturfasern als Füllstoff ausgewählt. Diese sind im Folgenden näher beschrieben. Die von den jeweiligen Herstellern angegebenen Materialdaten sind in Tabelle 6.13 vergleichend dargestellt.

AgriPlast NFPP 3070/40000 HM:

Das AgriPlast NFPP 3070/4000 HM (im Folgenden Agriplast) ist ein Compound aus 70 w-% Polypropylen und 30 w-% Cellulosefasern aus Gräsern von der BIOWERT INDUSTRIE GMBH. Das Material ist für Spritzgussanwendungen geeignet, flammgeschützt und laut Hersteller recycelbar und rückstandsfrei thermisch entsorgbar.

ARBOFILL® Fichte:

Der Markenname ARBOFILL® der Tecnar GmbH (im Folgenden Arbofill) umfasst verschiedene Compounds aus nachwachsenden Rohstoffen und Kunststoffen. Bei der verwendeten Variante handelt es sich um ARBOFILL® Fichte, also einen mit Fichtenholz gefüllten Kunststoff. Genauere Aussagen über die Art des Kunststoffes sind im Datenblatt nicht angegeben. Aufgrund des thermischen Verhaltens des Compounds wird als Matrix ein PP oder PE vermutet. Der Füllstoffgehalt beträgt 30 w-%

Jelu WPC 12 H:

Das Jelu WPC 12 H (im Folgenden Jelu WPC) ist ein Compound aus 50 % Holzfasern, 47 % Polypropylen und 3 % nicht weiter spezifizierten Additiven und wird vom JELU-WERK der J. Ehrler GmbH & Co. KG produziert. Anwendungsgebiete dieses Verbundwerkstoffs sind vorwiegend Spritzgussbauteile z.B.

Spielzeug, Möbelfüße, Knöpfe, Pflanzschalen, Innenausstattung für die Automobilindustrie und Aufbewahrungsbehälter [108].

Tabelle 6.13: Materialdaten der kommerziellen Referenzmaterialien [109-111]

Kenngröße	Geprüft nach	Agriplast	Arbofill	Jelu WPC
Elastizitätsmodul	ISO 527	1762 MPa	2600 MPa	4520 MPa
Streckspannung	ISO 527	25,8 MPa	29 MPa	-
Streckdehnung	ISO 527	4,1 %	7,0 %	-
Zugfestigkeit	ISO 527	25,8 MPa	27 MPa	33 MPa
Dehnung bei Zugfestigkeit	ISO 527	4,1 %	9,0 %	2,0 %
Biege-Elastizitätsmodul	ISO 178	1649 MPa	-	4260 MPa
Biegefestigkeit	ISO 178	38,5 MPa	-	57 MPa
Biegedehnung bei Biegefestigkeit	ISO 178	5,7 %	-	2,5 %
CHARPY-Schlagzähigkeit ungekerbt	ISO 179	16,6 kJ/m ²	17 kJ/m ²	10,6 kJ/m ²
CHARPY-Schlagzähigkeit gekerbt	ISO 179	2,25 kJ/m ²	-	3,4 kJ/m ²
Dichte	ISO 1183	0,977 g/cm ³	-	1,05 g/cm ³
VICAT-Erweichungstemperatur	ISO 306	155 °C		
HDT/A	ISO 75	-	-	90 °C
HDT/ B	ISO 75	-	111 °C	-

Zusätzlich zu den kommerziellen NFK-Produkten wurden im Rahmen dieser Arbeit mit dem PP „H734-52RNA“ und dem PA „Schulamid® 6 HV“ Flachsfasern-Compounds hergestellt. Bei der verwendeten Flachsfasern handelt es sich um ein „Hechelband Kammzug Flachs aus Langflachs“, das von der Holstein Flachs GmbH produziert und vertrieben wird [112]. Die Flachsfasern wurden nach der Ernte mittels Tauröste aufgeschlossen, wobei Pektine, die die Einzelfasern im Faserstängel zusammenhalten, von Mikroorganismen im Wasser auf dem Feld zersetzt wurden. Ein Datenblatt für die Flachsfasern ist nicht vorhanden. Die Länge der Einzelfaser kann mit bloßem Auge auf mehrere Zentimeter geschätzt werden.

6.3.2 Verarbeitung

Die für die Compoundierung der Flachsfasern-Compounds gewählten Prozessbedingungen entsprechen denen der Compounds aus Spuckstoff und jeweiliger Kunststoffmatrix. Die Fasern wurden vor der Compoundierung nicht zerkleinert. Sowohl die selbst hergestellten, als auch die kommerziell erhältlichen NFK wurden im Spritzgussprozess verarbeitet. Da es sich bei den erworbenen NFK ausschließlich um Compounds mit einer PP-Matrix handelt, wurden diese mit denselben Parametern verarbeitet, mit denen auch die selbst hergestellten PP-Compounds spritzgegossen wurden (siehe Tabelle 6.4). Die PA-Compounds mit Flachsfasern wurden analog zu den PA-Compounds mit Spuckstoff aus Kapitel 6.2 prozessiert.

6.3.3 Eigenschaften der Compounds

6.3.3.1 Mechanische Eigenschaften

6.3.3.1.1 Zugeigenschaften

Die Ergebnisse der Zugversuche der Naturfaserreferenzen sind in Abbildung 6.55 bis Abbildung 6.57 dargestellt.

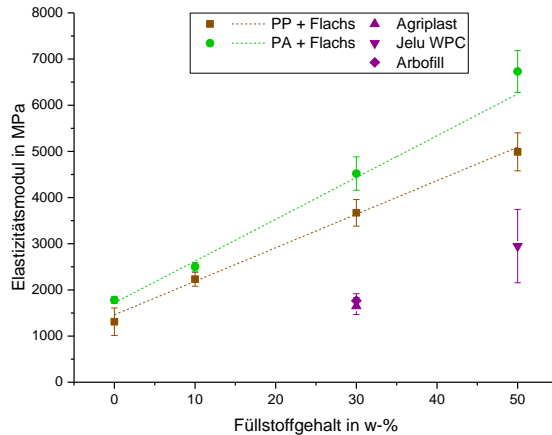


Abbildung 6.55: Elastizitätsmodul der Referenzmaterialien in Abhängigkeit vom Füllstoffgehalt

Die Erhöhung des Füllstoffgehaltes bewirkt bei den selbst hergestellten Flachsfaser-Compounds einen Anstieg des Elastizitätsmoduls. Die kommerziellen Compounds liegen deutlich unterhalb der Werte der selbst compoundierten Materialien. Wie bereits bei den Spuckstoff-Compounds beobachtet wird mit PA eine gleichwohl absolut als auch relativ intensivere Versteifung erreicht als mit PP. Begründet ist dies in der besseren Faser-Matrix-Haftung zwischen PA und Flachsfaser.

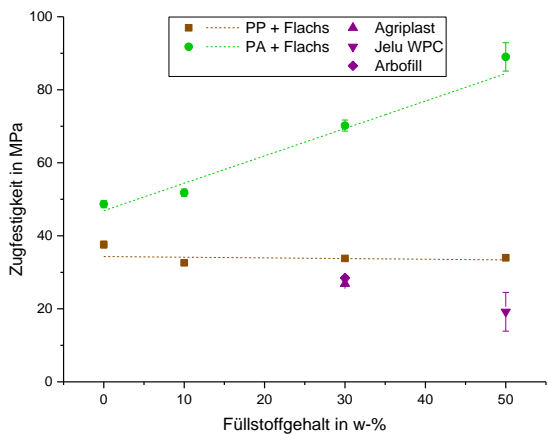


Abbildung 6.56: Zugfestigkeit der Referenzmaterialien in Abhängigkeit vom Füllstoffgehalt

Diese ist auch in der Zunahme der Zugfestigkeit über den Füllstoffgehalt bei den PA-Flachs-Compounds zu erkennen. Bei den Compounds mit PP fällt die Zugfestigkeit mit steigendem Füllstoffgehalt ab. Das Material versprödet. Die maximale Dehnung (siehe Abbildung 6.57) nimmt bei allen Mischungen mit steigendem Füllstoffgehalt ab.

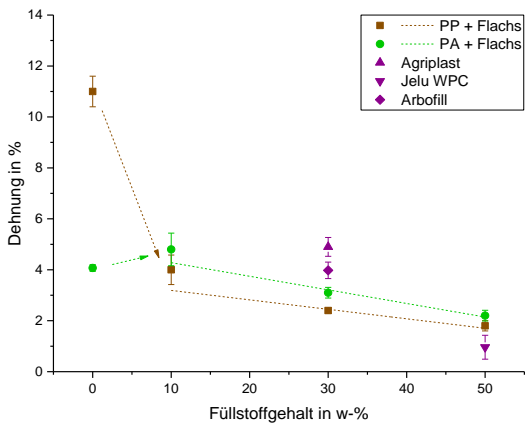


Abbildung 6.57: maximale Dehnung der Referenzmaterialien in Abhängigkeit vom Füllstoffgehalt

Hierbei zeigen die beiden kommerziellen Compounds Agriplast und Arbofill eine höhere Dehnung als die selbst compoundingierten Materialien. Das Jelu WPC hat im Vergleich mit den anderen Materialien die schlechtesten mechanischen Kennwerte. Außerdem erreicht es vermutlich aufgrund der verwendeten kleinen Probekörper vom Typ 1BB nicht die im Datenblatt angegebenen Werte. Die Holzfasern sind gegenüber den Flachs- und Grasfasern wesentlich kürzer. Der hohe Füllstoffgehalt macht das Jelu WPC zusätzlich spröder, als das mit 30 w-% gefüllte Arbofill.

6.3.3.1.2 CHARPY-Schlagzähigkeit

Die CHARPY-Schlagzähigkeit der Naturfasercompounds in Abhängigkeit vom Füllstoffgehalt ist in Abbildung 6.58 dargestellt.

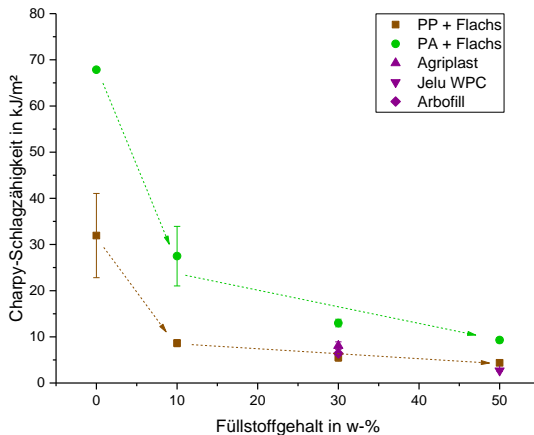


Abbildung 6.58: CHARPY-Schlagzähigkeit der Referenzmaterialien in Abhängigkeit vom Füllstoffgehalt

Es ist zu erkennen, dass die Schlagzähigkeit aller Compounds deutlich mit steigendem Füllstoffgehalt abfällt. Die Compounds mit PA-Matrix erreichen wiederum aufgrund der besseren Faser-Matrix-Haftung höhere Kennwerte, als die PP-Compounds. Bei den

Referenzen sind das Agriplast und das Arbofill geringfügig schlagzäher als das PP, während das Jelu WPC die geringste Schlagzähigkeit aufweist. Auffällig sind zudem die großen Standardabweichungen bei dem ungefüllten PP und dem PA mit 10 w-% Flachsfasern. Diese resultieren dadurch, dass einige Probekörper bei den verwendeten Parametern nicht gebrochen sind, sondern vom Schlaghammer nur deformiert wurden und zwischen den Auflagern hindurchrutschen konnten. Ein anderer Prüfhammer mit höherer Fallenergie konnte bei dem gewählten Auflageabstand, der durch die Probenabmessungen limitiert war, nicht verwendet werden.

6.3.3.2 Thermische Eigenschaften

6.3.3.2.1 Schmelz- und Kristallisationsverhalten

Die Ergebnisse der DSC-Messungen der Referenzmaterialien sind in Abbildung 6.59 und Abbildung 6.60 dargestellt.

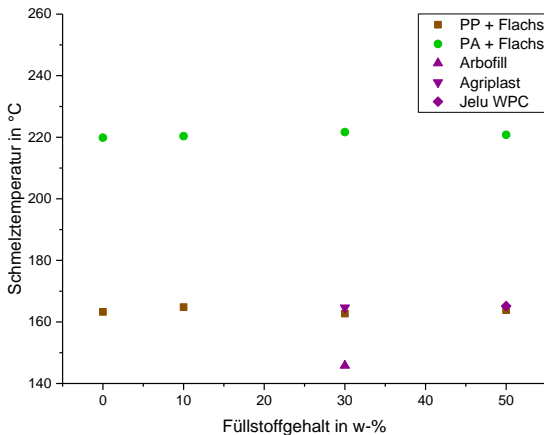


Abbildung 6.59: Schmelztemperatur der Referenzmaterialien in Abhängigkeit vom Füllstoffgehalt

Bei Betrachtung der Schmelztemperaturen ist zu erkennen, dass sich diese bei den selbst compoundingierten Materialien im Rahmen

der Messgenauigkeit nicht verändert. Das Agriplast und das Jelu WPC besitzen eine ähnliche Schmelztemperatur, wie die PP-Flachs-Compounds. Das Arbofill schmilzt bei deutlich tieferen Temperaturen, was auf ein niedrig schmelzendes PP als Matrix hindeutet.

Die Schmelzenthalpie der Referenzmaterialien (siehe Abbildung 6.60 links) sinkt mit steigendem Füllstoffanteil ab. Die Normierung der Schmelzenthalpie auf den Kunststoffanteil (Abbildung 6.60 rechts) zeigt, dass die Schmelzenthalpie der Flachs-Compounds überproportional stark absinkt. Ob diese Verringerung der Kristallinität mit einer thermischen Zersetzung des Materials zusammenhängt, wird in Kapitel 6.3.3.2.2 in Zusammenhang mit den Daten der TGA-Messungen diskutiert. Theoretisch hätte die Zugabe der Fasern eher zu einer Keimbildungswirkung und damit zu einer Zunahme der Kristallinität führen sollen.

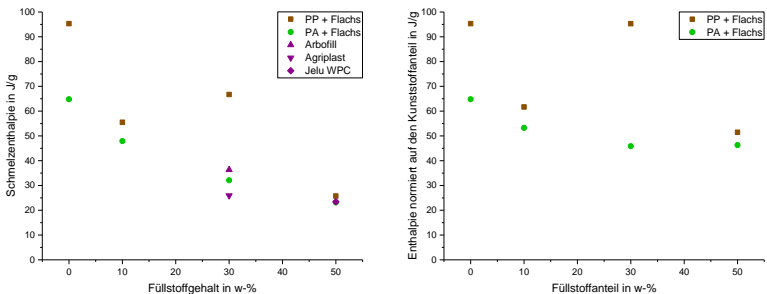


Abbildung 6.60: Schmelzenthalpie der Referenzmaterialien und normierte Schmelzenthalpie der Flachs-Compounds in Abhängigkeit vom Füllstoffgehalt

Bei den PP-Flachs-Compounds sind außerdem Schwankungen der normierten Enthalpien zwischen den verschiedenen Füllstoffgehalten zu sehen. Diese Schwankungen lassen sich auf Inhomogenitäten im für die Messungen verwendeten Material zurückführen. Aufgrund der Inkompatibilität von PP und Flachsfaser kann es zu einer ungleichmäßigen Verteilung der Fasern in der Matrix gekommen sein. Bei

der DSC-Messung werden nur wenige Milligramm Material verwendet, sodass die genommene Probe ggf. nicht repräsentativ für die hergestellte Mischung ist.

6.3.3.2.2 Thermische Zersetzung

Die Ergebnisse der TGA-Messungen für die selbst compoundingierten NFK sind in Abbildung 6.61 und Abbildung 6.62 dargestellt.

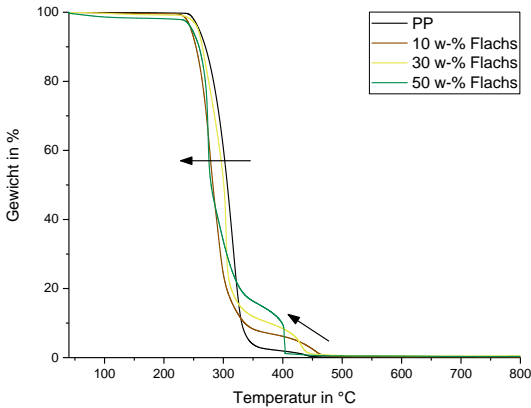


Abbildung 6.61: TGA-Kurve der Compounds aus Flachs und PP

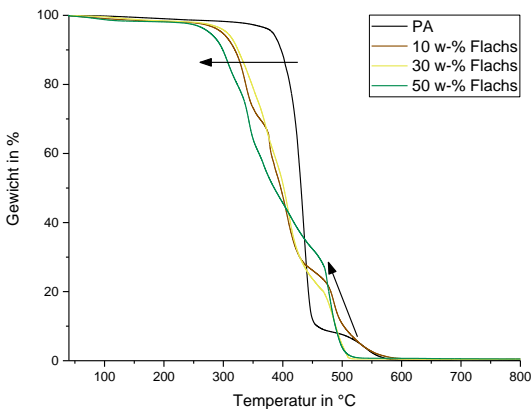


Abbildung 6.62: TGA-Kurve der Compounds aus Flachs und PA

Die Kurven besitzen bei beiden Matrixsystemen zwei Zersetzungstufen. In beiden Fällen wird die erste Zersetzung mit steigendem Füllstoffgehalt zu niedrigeren Temperaturen verschoben. Die zweite Stufe beginnt ebenfalls bei niedrigeren Temperaturen und zeigt einen größeren Gewichtsverlust. Diese Trends sind beim Vergleich der ungefüllten Matrixsysteme (schwarz) und der Mischungen mit 50 w-% (grün) gut zu erkennen. Die beiden Abstufungen dazwischen mit 10 w-% und 30 w-% zeigen jedoch in manchen Kurvenabschnitten Abweichungen dazu. Dies lässt sich, wie bereits die Schwankungen in den DSC-Messungen durch Inhomogenität im Material erklären.

Da bei den DSC-Messungen die Schmelzenthalpie und damit die Kristallinität mit steigendem Füllstoffgehalt abnehmen, gilt es mithilfe der TGA-Messungen zu überprüfen, ob eine Zersetzung des Materials stattfindet. Die Kurven in Abbildung 6.61 und Abbildung 6.62 zeigen im Bereich bis 250 °C, in dem die Verarbeitung stattfand und in dem die DSC-Messungen durchgeführt wurden, nur eine geringfügige Gewichtsabnahme, die auf den Verlust von Feuchtigkeit zurückzuführen ist.

Eine Betrachtung der TGA-Kurven des uncompoundierten Flachs (siehe Abbildung 6.63) zeigt, dass bei 250 °C bereits knapp 10 % des Probenmaterials zersetzt sind. Die hierbei entstehenden Zersetzungsprodukte können, wie bereits in Kapitel 6.1.3.2.2 diskutiert zu einer Kettenverkürzung der Matrixpolymere während der Verarbeitung beitragen, wodurch sich die Morphologie des Compounds ändert.

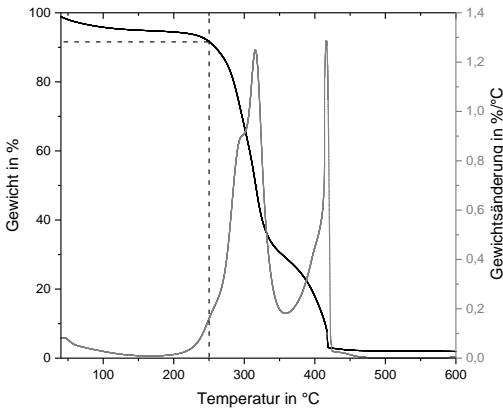


Abbildung 6.63: TGA-Kurve und abgeleitete TGA-Kurve von Flachs

Die kommerziellen NFK zeigen ein insgesamt unauffälliges Zersetzungsverhalten mit zwei bis drei Zersetzungsstufen, die frühestens bei 200 °C beginnen. Als Beispiel ist an dieser Stelle das Jelu WPC in Abbildung 6.64 dargestellt. Die Ergebnisse des Agriplast und des Arbofill befinden sich im Anhang. Da für alle drei Fälle die Füllstoffe nicht einzeln vorlagen, lassen sich keine direkten Rückschlüsse von den TGA-Kurven auf die Zusammensetzung schließen. Wichtig ist somit hauptsächlich die thermische Stabilität bis 200 °C, um eine zersetzungsfreie Verarbeitung garantieren zu können.

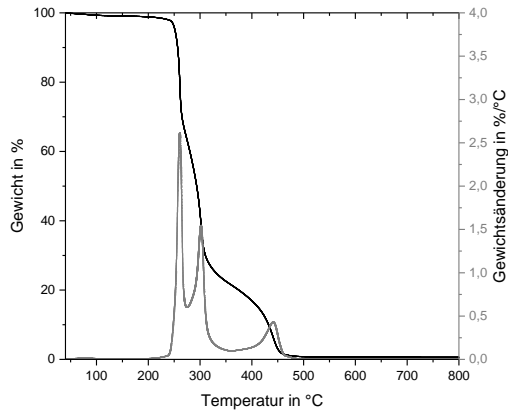


Abbildung 6.64: TGA-Kurve und abgeleitete TGA-Kurve des Jelu WPC

6.3.3.2.3 Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit wurde im Rahmen einer Projektarbeit [91] für das Agriplast bestimmt. Mit einer Wärmeleitfähigkeit von ca. $0,25 \text{ W/K}\cdot\text{m}$ liegt dieses in der Größenordnung der Spuckstoff-Compounds mit 30 w-% ($0,25 \text{ W/K}\cdot\text{m}$ bis $0,35 \text{ W/K}\cdot\text{m}$). Aufgrund von Ähnlichkeiten in der Struktur aller verwendeten Naturfasern ist anzunehmen, dass auch die anderen Naturfasercompounds keine signifikant höhere oder niedrigere Wärmeleitfähigkeit besitzen, die außerhalb der Messabweichung durch Messfehler liegt. Auf weitere Messungen wurde daher verzichtet.

6.3.3.2.4 Fließverhalten

Die Viskositätskurven der Referenzmaterialien zeigen ein viskoelastisches Fließverhalten und sind in Abbildung 12.19 im Anhang dargestellt. Zum besseren Vergleich wurden erneut die Viskositäten bei einer Winkelgeschwindigkeit von 100 rad/s gegen den Füllstoffgehalt ausgewertet (siehe Abbildung 6.65).

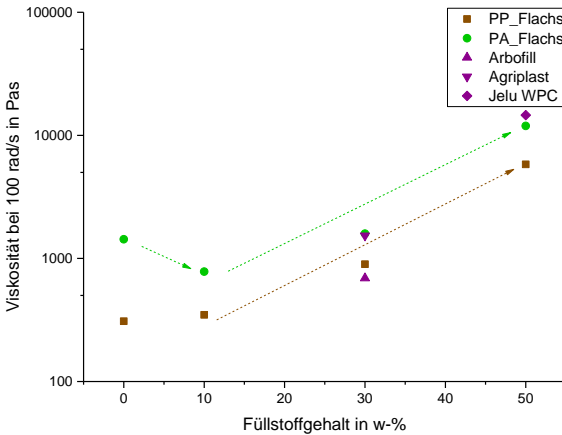


Abbildung 6.65: Viskositäten der Referenzmaterialien bei 100 rad/s in Abhängigkeit des Füllstoffgehaltes

Es ist zu erkennen, dass mit steigendem Füllstoffgehalt die Viskosität zunimmt. Einzige Ausnahme ist das PA mit 0 w-% und 10 w-% Flachs, da hier die gemessene Viskosität aufgrund der Schergeschwindigkeitsüberhöhung, wie bereits in Kapitel 6.1.3.2.4 für die Spuckstoff-Compounds beschrieben, leicht sinkt.

Beim Vergleich der verschiedenen Materialien mit identischem Füllstoffgehalt wird deutlich, dass die Viskosität der selbst hergestellten Compounds mit PA über derer der selbst hergestellten Compounds mit PP liegt. Die kommerziellen Compounds mit PP (Agriplast und Jelu WPC) zeigen z.T. Viskositäten, die eher mit den PA-Compounds vergleichbar sind. Das Arbofill hingegen ähnelt eher den selbst compoundingierten PP-Mischungen.

Die Ergebnisse der Messungen der Fließweglängen sind in Abbildung 6.66 und Abbildung 6.67 dargestellt.

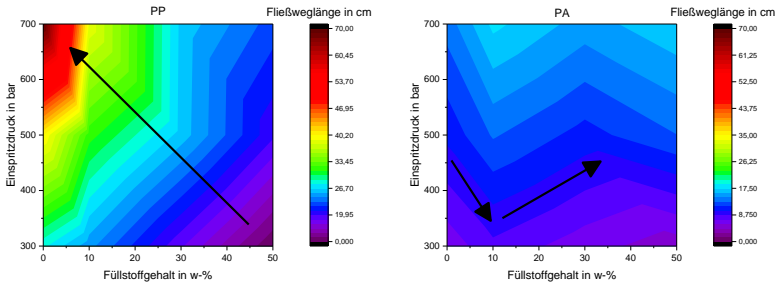


Abbildung 6.66: Fließweglänge der Flachs-Compounds in Abhängigkeit vom Füllstoffgehalt und Einspritzdruck

Bei den Flachs-PP-Compounds nimmt die Fließweglänge mit steigendem Einspritzdruck und sinkendem Füllstoffgehalt zu. Die Compounds aus PA und Flachs zeigen erneut den Einfluss der Schergeschwindigkeitsüberhöhung, da von 0 w-% auf 10 w-% eine Zunahme der Fließweglänge und damit eine Abnahme der Viskosität auftritt. Danach steigt die Viskosität wieder an.

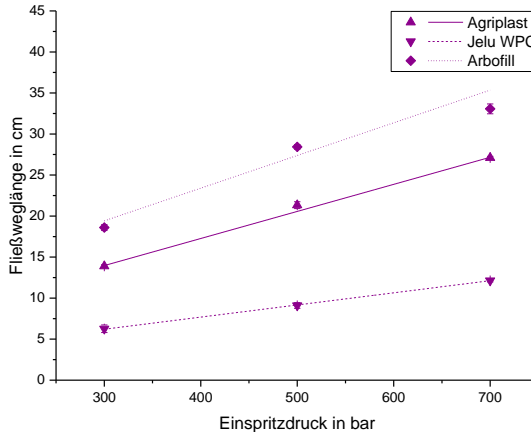


Abbildung 6.67: Fließweglänge der kommerziellen NFK in Abhängigkeit vom Einspritzdruck

Für die kommerziellen Referenzmaterialien konnte nur die Fließweglänge gegen den Einspritzdruck aufgetragen werden, weil

der Füllstoffgehalt bei gleicher Füllstoffart nicht variiert wurde. Wie zu erwarten war, steigt die Fließweglänge linear mit dem Einspritzdruck an. Das am höchsten gefüllte Material Jelu WPC (50 w-%) zeigt die geringste Fließweglänge. Bei den beiden mit 30 w-% Füllstoff gefüllten Materialien Arbofill und Agriplast besitzt das Arbofill die höhere Fließweglänge. Dies ist durch die vergleichsweise niedrigere Schmelztemperatur des Arbofill (siehe Tabelle 6.13 in Kapitel 6.3.1) bedingt.

6.3.3.3 Sonstige Eigenschaften

6.3.3.3.1 Wasseraufnahme

Die Wasseraufnahme der Referenzmaterialien nach 2,5 h in siedendem Wasser ist in Abbildung 6.68 dargestellt.

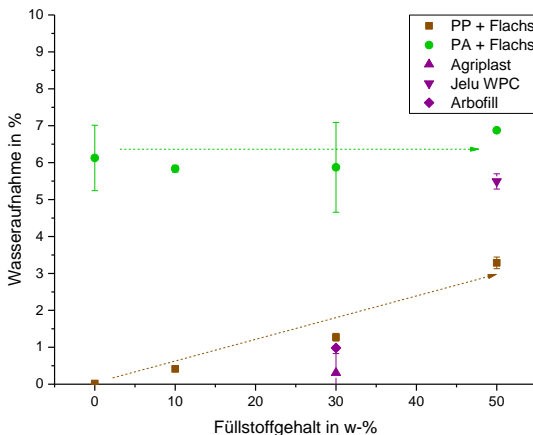


Abbildung 6.68: Wasseraufnahme der Referenzmaterialien

Wie bereits bei den Spuckstoffcompounds beobachtet, nimmt die Wasseraufnahme der Mischungen mit PP mit steigendem Füllstoffgehalt zu. Beim Polyamid ist die Wasseraufnahme bereits im ungefüllten Zustand recht hoch. Die Zugabe des Flachs trägt erst bei 50 w-% zur Erhöhung der Wasseraufnahme bei.

Die beiden kommerziellen NFK mit 30 w-% Faseranteil und PP-Matrix Agriplast und Arbofill zeigen eine etwas geringere Wasser-

aufnahme, als die selbst hergestellten PP-Flachs Compounds. Dies kann aus der Zugabe von Additiven oder Unterschiede im Wasseraufnahmeverhalten der eingesetzten Fasern resultieren. Das Jelu WPC hingegen nimmt fast doppelt so viel Wasser auf, wie das entsprechende Compound mit Flachs. Die im Jelu WPC verwendeten Holzfasern nehmen Wasser wesentlich besser auf, als die Flachsfasern.

6.3.3.3.2 Schimmelpilzresistenz

Die Untersuchung der Schimmelresistenz wurde beispielhaft am Agriplast durchgeführt. Wie im Vergleich aller Materialien in Kapitel 8.3.2 in Abbildung 8.20 gesehen werden kann, ist der Schimmelbewuchs nach der ersten Woche noch sehr gering (=1). Ab der zweiten Woche sind die Proben bereits mit der maximalen Bewertung gekennzeichnet. Die Zugabe von Glukose beschleunigt das Wachstum in der ersten Woche, sodass die Bewertung „2“ vorgenommen wurde. Nach zwei Wochen sind auch die nach Verfahren B behandelten Proben zu über 50 % mit Pilzen bewachsen. Die Naturfasern bieten somit ausreichend Nährstoffe für Schimmelwachstum und wirken nicht fungizid.

6.3.4 Kostenabschätzung und Anwendungsbeurteilung

Die Kosten für naturfaserverstärkte Kunststoffe setzten sich, wie bereits bei den Spuckstoff-Compounds, aus den Kosten für die Ausgangsmaterialien, die Compoundierung und die Verarbeitung zum Bauteil im Spritzguss zusammen. Für die kommerziell erhältlichen Referenzmaterialien sind die Marktpreise zum Zeitpunkt der Erstellung der Arbeit in Tabelle 6.14 angegeben. Diese Preise dienen als Richtwerte und unterliegen den Preisschwankungen der Ausgangsmaterialien.

Tabelle 6.14: Marktpreise der verwendeten, kommerziell erhältlichen NFK (Stand Januar 2019)

Material	Preis in €/t	Quelle
Agriplast	1550	[113]
Jelu WPC	1600	[114]
Arbofill	2740	[115]

Für die selbst hergestellten Flachsfaser-Compounds können die Materialkosten in die Kosten für Faser und Matrix unterteilt werden. Die Preise der Matrixkunststoffe wurden bereits in Tabelle 6.7 in Kapitel 6.1.4 dargestellt. Die verwendeten Flachsfasern wurden von der Holstein Flachs GmbH bezogen, die ihre Fasern in Handarbeit aufbereitet und unter anderem im Internet verkauft. Das verwendete Hechelband aus Leinen wird ab 0,2 kg vertrieben und kostet 5,50 €/100g [112]. Daraus würde sich ein Preis von 55000 €/t ergeben. Dieser Preis liegt aufgrund der manuellen Herstellungsschritte sowie des Vertriebs in Kleinmengen weit oberhalb der regulären Marktpreise von industriell gewonnenen Naturfasern, die laut Studien der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) bei ca. 400 €/t bis 700 €/t betragen, abhängig von der Faserart [98]. Flachsfasern liegen dabei zwischen 500 €/t und 600 €/t. Dieser Preis ergibt sich aus den Kosten für Anbau, Ernte und Aufschluss der Fasern. Dabei ist zu beachten, dass sowohl Anbau, als auch der erste Verarbeitungsschritt von der EU subventioniert werden. Ohne diese Subventionen müsste der Preis deutlich höher sein. Da beispielsweise aus China Flachsfasern günstig importiert werden können, würde eine Aufhebung der EU-Beihilfen jedoch nicht zu einem Preisanstieg, sondern zum Ende der europäischen Flachsproduktion führen [98].

Der genaue Preis für Flachsfasern ist abhängig von der Länge und der Qualität der Fasern. Eine Übersicht über die verschiedenen Faserarten, ihre Menge, Preise und Umsätze in der EU ist in Tabelle 6.15 dargestellt.

Tabelle 6.15: Menge, Preise und Umsätze der EU-Faserflachswirtschaft im Jahr 2003 nach [98]

Faserart	Menge in t	Preis in €/t	Umsatz in Mio. €	Umsatz- anteil in %
Textile Langfasern	115.321	1.593	183,7	88,6
Textile Kurzfasern	29.500	345	10,2	4,9
Kurzfasern für normale und Spezialpapiere	25.000	170	4,3	2,1
Kurzfasern für Non- Wovens	1.850	400	0,7	0,3
Kurzfasern für Verbundwerkstoffe	17.000	500	8,5	4,1

In der folgenden Betrachtung werden für eine industriell hergestellte Flachsfaser Materialkosten von 500 €/t angenommen. Die Compoundierung kostet, wie bereits in den vorherigen Kapiteln angenommen 280 €/t. In Kombination mit den Materialpreisen für PP und PA ergeben sich somit die in Abbildung 6.69 dargestellten Preisverläufe in Abhängigkeit des Füllstoffgehaltes. Die Preise der ungefüllten Materialien sind als gestrichelte Linie dargestellt. Es ist zu sehen, dass eine Verstärkung des PA ab ca. 19 w-% Füllstoffgehalt zu einer Kostenersparnis führt. Bei PP müssen über 60 w-% Fasern hinzugegeben werden, um Kosten zu reduzieren. Bei der Kombination von Flachs und PP steht somit nicht die Kostenersparnis, sondern die Eigenschaftsoptimierung im Vordergrund.

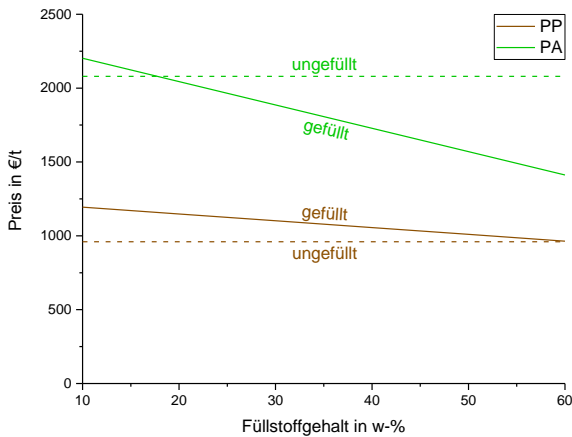


Abbildung 6.69: Preise der Compounds aus Flachs und PP bzw. PA in Abhängigkeit des Füllstoffgehaltes

Typische Anwendungen für NFK finden sich in der Automobilindustrie (z.B. siehe Abbildung 6.70).



Abbildung 6.70: Türinnenverkleidung aus NFK [97]

2015 wurden alleine 90.000 t NFK in diesem Sektor verwendet [97]. In der Serienproduktion etablierte Beispiele sind Handschuhfächer (Audi A2) und Haltehaken am Sitz (Mercedes S-Klasse). Diese beiden Bauteile werden aus NFK mit PP-Matrix im Spritzgussprozess hergestellt. Der Großteil der NFK im Automobil wird jedoch mittels Formpressen verarbeitet und besitzt zu über 50 % eine duroplastische Matrix [97, 98]. Für den Vergleich in dieser Doktorarbeit sind nur die thermoplastischen, im Spritzguss verarbeiteten Thermoplaste interessant.

Weitere Anwendungsfelder sind meist Nischenprodukte, bei denen glasfaser- oder ungefüllte, erdölbasierte Kunststoffe durch Materialien aus erneuerbaren Ressourcen ersetzt werden sollen. Gute Beispiele sind hierbei für das Agriplast bekannt. Die CORTEC GMBH stellt daraus Kleiderbügel her [116], bei NOTHROW DESIGN werden Aufhängesysteme daraus angeboten [117] und die AMMER AG hat einen Teil ihrer Unterputzdosen für Elektroinstallationen auf dieses Material umgestellt [118]. In allen Fällen handelt es sich dabei um geringfügig belastete Bauteile.

Wie bereits in Kapitel 6.1.4 diskutiert, können die Prozesskosten zur Verarbeitung vom Granulat zum Spritzgussbauteil für NFK und Spuckstoff-Compounds als identisch angenommen werden. Die Kosten für Granulat mit Naturfasern übersteigen die der Compounds mit Spuckstoff bei allen Füllstoffgehalten aufgrund des höheren Preises der Naturfasern bzw. der in den kommerziellen Compounds enthaltenen Additive (siehe Abbildung 6.71). Eine Verknüpfung zwischen diesem höheren Preis und den Eigenschaften folgt beim Vergleich aller Materialien in Kapitel 8.

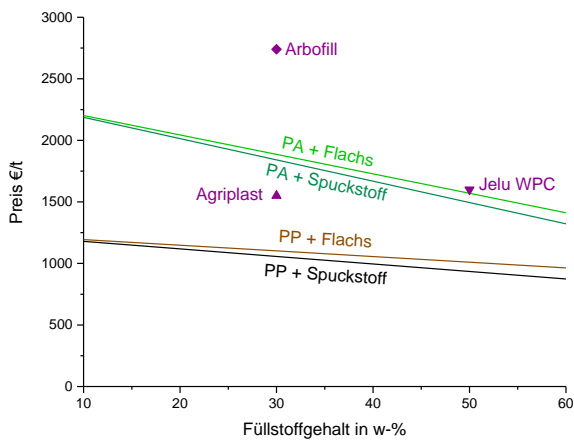


Abbildung 6.71: Preise der Compounds aus PP und PA mit Flachs bzw. Spuckstoff im Vergleich

7 Eigenschaftsoptimierung der Spuckstoffcompounds

7.1 Eigenschaftsoptimierung durch Aufbereitung des Spuckstoffes

7.1.1 Ausgangsmaterial

Die bisher vorgestellten Ergebnisse behandelten Compounds einer einzelnen Spuckstoffcharge, die getrocknet und in einer Schneidmühle zerkleinert wurde. Diese Auswahl ist für strukturierte Untersuchungen sinnvoll, verringert jedoch auch die Übertragbarkeit in einen realen Prozess und macht Generalisierungen schwer.

In diesem Kapitel werden daher Veränderungen in der Zusammensetzung und der Aufbereitung des Spuckstoffes im Hinblick auf ihre Auswirkungen auf die Eigenschaften der Compounds diskutiert. Im Einzelnen sind dies:

- der Verzicht auf den Zerkleinerungsschritt vor der Compoundierung,
- die Reinigung des Spuckstoffes mittels Soxhlet-Extraktion,
- eine Abtrennung von Kontaminationen durch das Schwimm-Sink-Verfahren,
- die Verwendung von Spuckstoff von verschiedenen Produktionstagen einschließlich der Bestimmung der Zusammensetzung dieser verschiedenen Chargen,
- die gezielte Zugabe der beiden Hauptfremdkörper EPS und Holz

und

- die vollständige Abtrennung aller Komponenten, die keine Papierfasern sind, durch Klaubung.

Ein Teil dieser Untersuchungen wurde im Rahmen studentischer Arbeiten durchgeführt bzw. bereits veröffentlicht [74, 75, 119, 120]. Da es galt, die Tendenzen aufzuzeigen, wurde das PP als

Matrixsystem gewählt, welches bereits in Kapitel 6.1.1 vorgestellt wurde.

7.1.2 Aufbereitung des Spuckstoffes und Verarbeitung

Um die Papierfasern des Spuckstoffs von den Fremdstoffen zu trennen, wurden verschiedene Aufbereitungstechniken erprobt. Dabei wurde sich an der Zusammensetzung des Spuckstoffes und den Eigenschaften der Hauptkomponenten orientiert. Die erarbeiteten Verfahren lassen sich in zwei Gruppen aufteilen:

- Chemische Verfahren, welche vor allem zur Abtrennung des expandierten Polystyrols und zur Reinigung von der Fasern Druckfarben und Klebstoffen dienen, (Kapitel 7.1.2.1)

und

- mechanische Verfahren, die die physikalischen Eigenschaften der Komponenten nutzen (Kapitel 7.1.2.2).

Als chemisches Verfahren wurde die SOXHLET-Extraktion gewählt, da hier die gereinigten Fasern und das Extrakt getrennt voneinander vorliegen, und außerdem eine mehrfache Extraktion mit sauberem Lösungsmittel mit relativ geringem Aufwand möglich ist.

Im Bereich der mechanischen Verfahren wurden das Schwimm-Sink-Verfahren, das Sieben und das Sichten betrachtet. Außerdem wurde eine Apparatur konstruiert, mit der eine Trennung des Spuckstoffs möglich ist. Die Verarbeitung der chemisch oder mechanisch aufbereiteten Spuckstoffe erfolgte analog zu der des nicht aufbereiteten Spuckstoffes.

Im Falle der gezielten Kontamination mit EPS und Holz wurden diese beiden Komponenten im Compoundierschritt zusammen mit dem Spuckstoff eingearbeitet. Die dafür ausgewählten Zusammensetzungen sind im Dreistoffsystem in Abbildung 7.1 dargestellt.

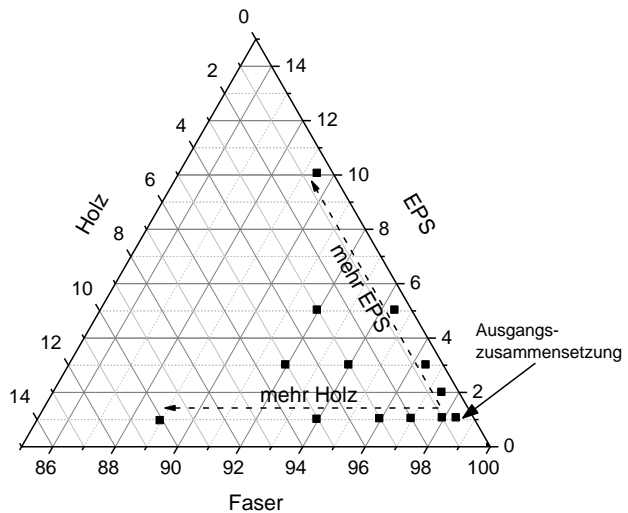


Abbildung 7.1: Zusammensetzung des Füllstoffs zur gezielten Kontamination des Spuckstoffes mit EPS und Holz [121]

7.1.2.1 Soxhlet-Extraktion

Die SOXHLET-Extraktion ist ein nach ihrem Erfinder FRANZ VON SOXHLET (1848-1926) benanntes Verfahren zur Extraktion von Feststoffen, welches vor allem für analytische Zwecke im Labormaßstab genutzt wird. Der Versuchsaufbau (siehe Abbildung 7.2) besteht aus einem mit Lösungsmittel gefüllten Rundkolben, welcher über ein Ölbad und eine Heizplatte temperiert wird. Auf diesem Kolben befindet sich ein SOXHLET-Aufsatz, in den wiederum eine Extraktionshülse mit dem zu extrahierenden Feststoff eingebracht wird. Der Aufsatz wird mit einem wassergekühlten Rückflusskühler versehen, um einerseits die Funktion des Extraktors sicherzustellen und andererseits Lösungsmittelverluste durch Verdampfung zu vermeiden. Der Ablauf des Prozesses ist in Abbildung 5.1 b bis d genauer dargestellt.

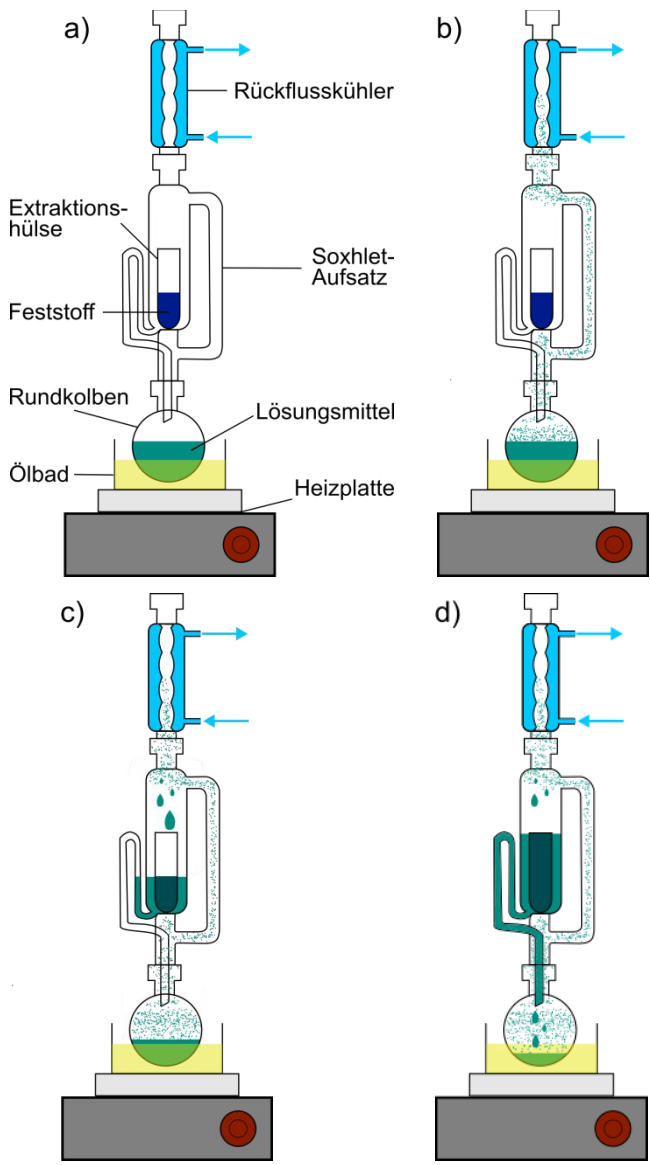


Abbildung 7.2: Aufbau (a) und Ablauf (b – d) der Soxhlet-Extraktion

Das Lösungsmittel wird im Rundkolben erwärmt, bis es oberhalb des Siedepunktes in den gasförmigen Zustand übergeht und das Steigrohr des Extraktors heraufsteigt (b). Der Lösungsmitteldampf kondensiert am Rückflusskühler und tropft auf den Feststoff in der Extraktionshülse. Dadurch füllt sich der SOXHLET-Aufsatz mit Flüssigkeit (c). Lösliche Stoffe werden nun aus dem Feststoff entfernt. Erreicht die Flüssigkeit einen Pegelstand oberhalb des Knies im seitlichen Heberohr, läuft das gesamte Lösungsmittel-Extrakt-Gemisch durch das Heberohr in den Rundkolben zurück, während der Feststoff in der Extraktionshülse verbleibt (d).

Im Rundkolben wird das Lösungsmittel nun wieder verdampft und der Prozess beginnt erneut. Im Regelfall verdampft lediglich das reine Lösungsmittel, sodass sich im Rundkolben über die gesamte Prozessdauer ein immer höher konzentrierter Extrakt anreichert. Für die Versuche im Rahmen dieser Arbeit wurde die Extraktion über 24 Stunden durchgeführt. Im Durchschnitt wurden dabei zehn Extraktionszyklen durchlaufen. Zum Vergleich wurde außerdem ein Versuch durchgeführt bei dem der Spuckstoff für 24 Stunden in Aceton gerührt wurde, ohne dass eine Erneuerung des Lösungsmittels stattgefunden hat. Die Fasern und das Lösungsmittel wurden danach durch Zentrifugieren und Dekantieren voneinander getrennt.

Im Anschluss an die Extraktion bzw. den Waschprozess konnte das überschüssige Lösungsmittel in einem Rotationsverdampfer abgetrennt werden, um einen konzentrierten Extrakt zu erhalten, welcher mittels IR-Spektroskopie (vgl. 4.3.4) untersucht wurde.

Zusätzlich zu den Extrakten wurden die unbehandelten und gereinigten Fasern untersucht, deren IR-Spektren zusammen mit dem Spektrum einer reinen Cellulosefaser in Abbildung 7.3 dargestellt sind. Mit Ausnahme von Intensitätsschwankungen weisen alle Fasern ähnliche Absorptionsbanden auf, die den funktionellen Gruppen von Cellulose (CH, OH, CH₂OH, COC) zuordenbar sind [122].

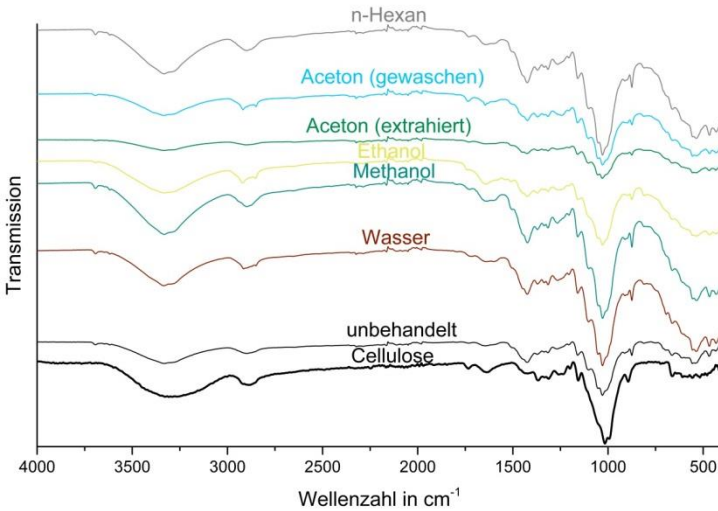


Abbildung 7.3: IR-Spektren der gereinigten Fasern und Cellulose

Die IR-Spektren der Extrakte sind in Abbildung 7.4 dargestellt. Im Gegensatz zu den Spektren der gereinigten Fasern sind hier zum Teil deutliche Unterschiede zu erkennen.

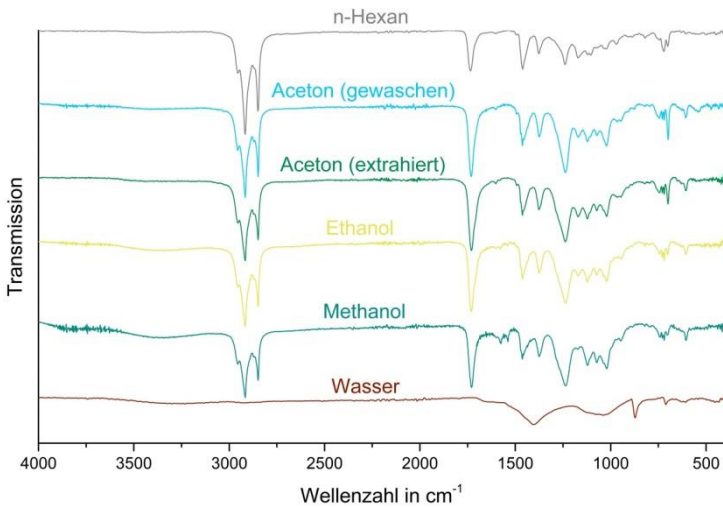


Abbildung 7.4: IR-Spektren der aus der Soxhlet-Extraktion erhaltenen Extrakte

Das Extrakt, das aus der Extraktion mit Wasser erhalten wurde, zeigt insgesamt eine sehr geringe Absorption. Beim Vergleich der Konsistenz der Extrakte fällt auf, dass dies das einzige Extrakt ist, welches vollständig fest und eher pulverförmig ist. Daher ist es wahrscheinlich, dass es sich bei dem Extrakt um einen kristallinen Feststoff, z.B. ein Salz oder Mineral handelt [122]. Eine Literaturrecherche zu diesem Thema ermöglicht es drei der Absorptionsbanden eindeutig CaCO_3 zuzuordnen [123].

Die Bande bei 1418 cm^{-1} gehört zu der C-O-Streckschwingung in Calcit, der trigonalen Kristallform des Kalkspats. Auch die Banden bei 876 cm^{-1} und 713 cm^{-1} sind auf die C-O-Bindung zurückzuführen, allerdings auf Deformationsschwingungen innerhalb und außerhalb der Molekülebene. Nicht genau zuzuordnen ist die breite Bande zwischen 1200 cm^{-1} und 1000 cm^{-1} . Es gibt zwar vereinzelte Quellen [124], die diese Bande TiO_2 zuordnen, um diese Vermutung zu bestätigen fehlen jedoch weitere charakteristische Absorptionsbanden. Insgesamt lässt sich somit feststellen, dass Wasser hauptsächlich anorganische Bestandteile aus dem Spuckstoff extrahiert, die zum Beispiel zur Färbung oder Aufhellung des Papiers verwendet werden.

Die Extrakte der anderen Lösungsmittel ähneln einander sehr. Zur Übersicht sind die detektierten Absorptionsbanden in Kombination mit den zugehörigen chemischen Gruppen und Schwingungszuständen in Tabelle 7.1 gelistet. Die nachweisbaren Molekülschwingungen können zu einer Vielzahl organischer Moleküle gehören, sodass eine genaue Zuordnung zu einzelnen Stoffen nicht möglich ist. Aufgrund des Vorliegens von OH-, CH_2 - und $\text{CH}_2\text{-O-CH}_2$ -Gruppen und vor dem Hintergrund der Herkunft der Fasern sind in dem Extrakt u.a. Fette, Wachse und Klebstoffe enthalten.

Tabelle 7.1: Absorptionsbanden der Extrakte aus der Extraktion mit Methanol, Ethanol, Aceton und n-Hexan

Wellenzahl in cm^{-1}	chemische Gruppe / Schwingung
3700 - 3200	OH-Streckschwingung
2959 - 2850	CH_2 -Streckschwingung
Ca. 1730	$\text{C}=\text{O}$ -Streckschwingung
1480 – 1420	CH_2 -Deformationsschwingung
1290 - 1200	CH_2 -Drehschwingung
1170	Verzweigte Alkane, langkettige Moleküle mit C-C-Rückgrat
1120 -1020	CCO - und $\text{CH}_2\text{-O-CH}_2$ -Streckschwingungen

Im Vergleich der unterschiedlichen organischen Lösungsmittel untereinander sind zwei Absorptionsbanden von besonderer Bedeutung: Die breite OH-Bande zwischen 3700 cm^{-1} und 3200 cm^{-1} wird von Methanol über Ethanol und Aceton zu n-Hexan hin schwächer, während die Bande bei 1170 cm^{-1} in derselben Reihung zunimmt. Eine Erklärung hierfür stellen sowohl die Polarität der Lösungsmittel, als auch Betrachtungen unter Berücksichtigung des in Kapitel 2.2.2 vorgestellten HANSEN-Parameters zur Verfügung:

Die Polarität eines Lösungsmittels lässt sich über den empirischen Polaritätsparameter E_T^N [125] ausdrücken. Dieser Parameter reicht von Wasser ($E_T^N=1$) bis Tetramethylsilan ($E_T^N=0$), welches unpolar ist. Ein Vergleich des Polaritätsparameters der verwendeten Lösungsmittel und der relativen Masseabnahme des Spuckstoffes während der Extraktion (siehe Tabelle 7.2) zeigt, dass unpolare Lösungsmittel mehr Fremdstoffe aus dem Spuckstoff entfernen. Wasser folgt dieser Abfolge nicht, da es aufgrund des vollständig polaren Verhaltens nur polare Kontaminationen löst.

Tabelle 7.2: Empirischer Polaritätsfaktor E_T^N [125] und Masseabnahme während der Extraktion

Lösungsmittel	E_T^N	Relative Masseabnahme in %
n-Hexan	0,009	0,12
Aceton	0,355	0,08
Ethanol	0,654	0,08
Methanol	0,762	0,05
Wasser	1	0,09

Verknüpft mit den IR-Spektren ergibt sich somit, dass n-Hexan als unpolares Lösungsmittel am besten geeignet ist, um polare Rückstände, die z.B. von Fetten stammen, abzutrennen. Die anderen getesteten organischen Lösungsmittel lösen dafür neben polaren Kontaminationen auch unpolare Stoffe, die beispielsweise eine OH-Gruppe besitzen. Wasser besitzt eine Sonderrolle, da hierin unpolare Stoffe nicht gelöst werden, dafür aber manche anorganischen Komponenten lösbar sind. Eine dezidierte Betrachtung der Löslichkeit zweier Materialien liefert der HANSEN-Parameter. Die HANSEN-Parameter der verwendeten Lösungsmittel sowie möglicher Bestandteile des Spuckstoffes sind in Tabelle 7.3 tabellarisch und in Abbildung 7.5 grafisch dargestellt. Da in manchen Quellen nur die Löslichkeitsparameter angegeben sind, wurde z.T. der vollständige HANSEN-Parameter aus den Löslichkeitsparametern berechnet und in der Tabelle kursiv dargestellt. Zur Darstellung der Überbegriffe „Klebstoffe“ (grün), „Fette und Wachse“ (gelb), „Faserbestandteile“ (blau) und „anorganische Bestandteile“ (rot) wurden verschiedene Stoffe ausgewählt, die diesen Gruppen zugeordnet werden können. Zusätzlich ist EPS mitaufgeführt, da dieses mit bloßem Auge im Spuckstoff erkennbar ist. Ein Anspruch auf Vollständigkeit der Tabelle wird nicht erhoben.

Tabelle 7.3: HANSEN-Parameter der Lösungsmittel und möglicher Bestandteile des Spuckstoffes (selbst berechnete Werte sind kursiv dargestellt)

Stoff	δ_D in MPa ^{0,5}	δ_P in MPa ^{0,5}	δ_H in MPa ^{0,5}	δ in MPa ^{0,5}	Quelle
n-Hexan	7,24	0	0	7,24	[26], [28]
Aceton	7,58	5,1	3,4	9,77	[26], [28]
Ethanol	7,73	4,3	9,5	12,98	[28]
Methanol	7,42	6,0	10,9	14,49	[28]
Wasser	6,0	15,3	16,7	23,43	[28]
Dextran C	24,3	19,9	22,5	38,63	[126]
Saccharose	23,4	18,4	20,8	36,31	[126]
Methylmeth-acrylat	14,89	4,62	8,12	17,58	[29]
Butylacrylat	13,70	3,41	6,98	15,75	[29]
Desmophen 651 (PU)	10,6	11,6	9,5	17,7	[30]
Desmolac 4200 (PU)	9,6	9,9	8,2	18,7	[30]
Stearinsäure	16,49	1,31	5,59	17,46	[31]
Palmsäure	16,46	1,46	5,9	17,54	[31]
Dynasan 114 (Triglycerid)	1,73	1,09	5,20	17,56	[32]
Imwitor 900 (Tristearin)	16,7	1,50	9,18	19,26	[32]
Monecol PC (Cetylpalmitat)	16,31	0,88	3,54	16,71	[32]
Softemul 165 (PEG Glycerin-stearat)	16,93	2,00	10,92	20,25	[32]
Papier	20,3	16,3	18,7	32,05	[126]
Lignin	21,9	14,1	16,9	31,05	[126]
Cellulose	8,27	8,00	13,88	18,03	[26]
TiO ₂	17,02	9,2	13,2	4,87	[33]
Al ₂ O ₃	17,5	11,3	10,6	23,37	[34]
EPS	9,64	0,42	1,0	9,70	[27]

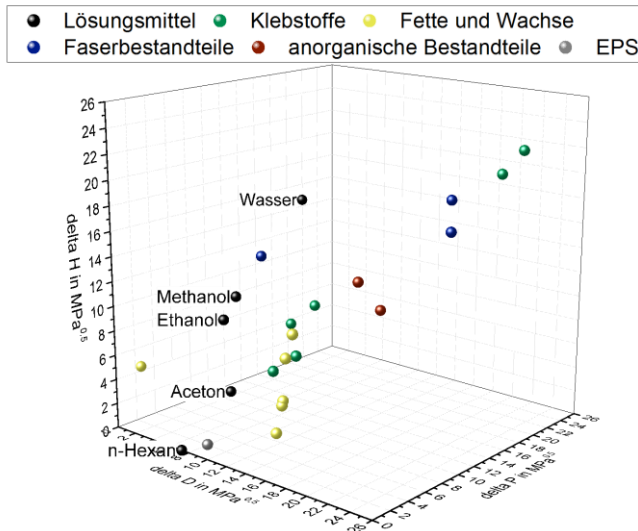


Abbildung 7.5: Grafische Auftragung der HANSEN-Parameter der Lösungsmittel und möglicher Komponenten des Spuckstoffes

Die Betrachtung der HANSEN-Parameter bestätigt die bereits bei Betrachtung des Löslichkeitsparameters aufgestellten Vermutungen: Die unpolaren Lösungsmittel n-Hexan und Aceton besitzen ähnliche HANSEN-Parameter wie die Fette und Wachse und ein Teil der Klebstoffe. Außerdem ist das EPS in diesen beiden Lösungsmitteln sehr gut lösbar. Methanol und Ethanol liegen im Koordinatensystem in der Nähe der meisten Klebstoffe und können potentiell in geringen Maßen auch einen Teil der Fette, die beiden anorganischen Füllstoffe und sogar Cellulose lösen. Wasser hingegen liegt relativ weit von den anderen Stoffen entfernt. Die nächstgelegenen Stoffe, d.h. die Stoffe mit dem geringsten Abstand R_a (siehe Formel 2.5 in Kapitel 2.2.2) sind Cellulose, sowie die beiden Klebstoffe Desmophen und Desmolac auf Polyurethanbasis. Da die hauptsächlich aus Cellulose bestehenden Fasern nicht vollständig von Wasser gelöst werden, kann der Löslichkeitsradius R_0 von

Wasser jedoch so klein angenommen werden, dass keiner der betrachteten Stoffe bei der Extraktion mit Wasser vollständig gelöst wird. Es scheinen somit noch weitere und vor allem wasserlösliche Kontaminationen im Spuckstoff enthalten zu sein, deren HANSEN-Parameter in Tabelle 7.3 nicht erfasst sind.

Zusammenfassend konnte gezeigt werden, dass die SOXHLET-Extraktion mit verschiedenen Lösungsmitteln eine Aufreinigung des Spuckstoffes ermöglicht. Insbesondere unpolare organische Lösungsmittel wie n-Hexan und Aceton lösen viele Nicht-Faser-Bestandteile des Spuckstoffes wie EPS, Fette und Klebstoffe. In wie weit sich diese lösungsmittelbasierte Aufbereitung auf die Eigenschaften der aus dem gereinigten Spuckstoff hergestellten Compounds auswirkt, wird in Kapitel 7.2.3 diskutiert.

7.1.2.2 Mechanische Trennung

Die zuvor vorgestellte chemische Aufbereitung des Spuckstoffes kann zwar einige lösliche Komponenten entfernen, ist jedoch nicht praxisgerecht, da der großtechnische Einsatz organischer Lösungsmittel meist mit Sicherheitsrisiken sowie stets mit Auflagen zum Arbeits- und Umweltschutz verbunden ist. Daher wurde auch die mechanische Aufbereitung des Spuckstoffes untersucht. Hierbei wurde sich zum Teil an den bereits in der Papierfabrik vorhandenen Aggregaten orientiert. Diese arbeiten alle mit einem feuchten bzw. in Wasser verteilten Ausgangsstoff. Zusätzlich wurde die weitere Aufbereitung des trockenen Spuckstoffes untersucht.

7.1.2.2.1 Trennung im trockenen Zustand

Für die Versuche zur Abtrennung im trockenen Zustand wurde der erhaltene und anschließend für 24 Stunden bei 80 °C im Trockenschrank getrocknete Spuckstoff verwendet. Da die Fasern während der Trocknung agglomerieren, wurde der Spuckstoff anschließend mit der Schneidmühle S15/20 der Firma DREHER zerkleinert, bevor weitere Aufbereitungsschritte folgten.

Trennung durch Siebung

Da die Papierfasern und die Störstoffe (EPS, Holz) unterschiedliche Abmessungen haben, ist theoretisch eine Klassierung durch Siebung möglich. Dies wurde im Rahmen der Bachelorarbeit von ANSCHÜTZ geprüft [120]. Hierzu wurde ein Siebturm aus Analysesieben nach DIN ISO 3310 [127] mit den Maschenweiten 8 mm, 4 mm, 2 mm, 1 mm, 0,5 mm, 0,25 mm und 0,125 mm und einer Rüttelplatte HAVER EML 400 Digital im Institut für Nichtmetallische Werkstoffe der Technischen Universität Clausthal genutzt.

Die sich ergebende Sieblinie ist in Abbildung 7.6 dargestellt. Zusätzlich wurden Fotos der Rückstände auf dem Sieben eingefügt.

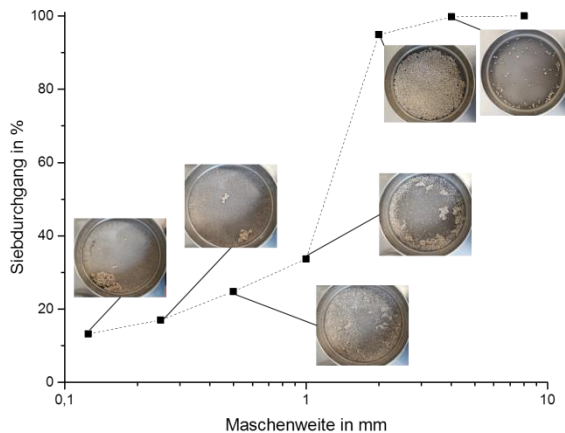


Abbildung 7.6: Sieblinie und erhaltene Fraktionen (nach [120])

Die Polystyrolkugeln befinden sich hauptsächlich auf den Sieben der Maschenweite 1 mm und 2 mm, dort sind jedoch auch viele Faseragglomerate zu finden. Die Holzsplitter sind ebenfalls in den Siebpartitionen > 1 mm zu finden. Eine Abtrennung der Störstoffe ist somit zwar möglich, allerdings würde diese mit einem Ausschuss von über 60 % des Materials einhergehen. Da für die Verwendung des Spuckstoffes als Füllstoff außerdem die Faserlänge von großer Bedeutung ist, die längeren Fasern jedoch in derselben Fraktion

liegen, wie die Störstoffe, wurde dieses Aufbereitungsverfahren nicht weiter verfolgt.

Trennung mittels Zick-Zack-Sichter

Als weiteres, trocken arbeitendes Klassierverfahren wurde die Schwerkraftsichtung mittels Zick-Zack-Sichter ausgewählt. Der Grundaufbau eines solchen Sichters und das grundlegende Trennprinzip sind in Abbildung 7.7 dargestellt.

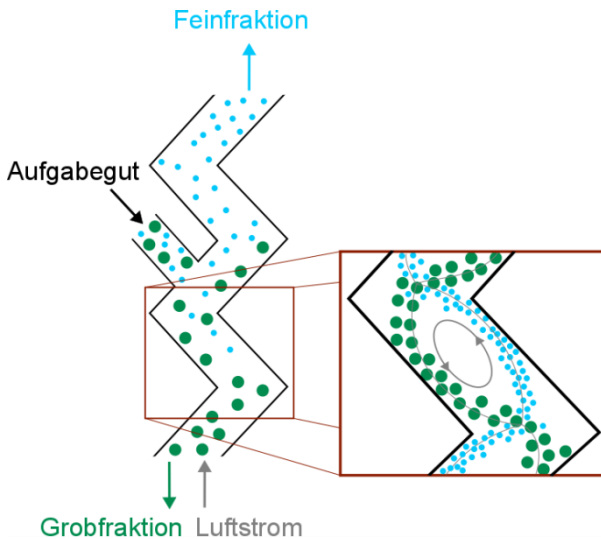


Abbildung 7.7: Aufbau eines Zick-Zack-Sichters und Trennprinzip

Auf die aufgegebenen Partikel wirken insgesamt drei Kräfte: Die Gewichtskraft nach unten sowie die ihr entgegengesetzte Auftriebskraft und die Widerstandkraft durch den von unten wirkenden Luftstrom. Diese drei Größen sind nicht nur von der Größe der Partikel, sondern auch von ihrem Gewicht, also einer durch die Dichte bedingte Größe, abhängig. Im Vergleich mit dem Sieben findet hierbei also nicht nur eine Klassierung nach der Partikelgröße statt.

Das Trennprinzip des Zick-Zack-Sichters basiert darauf, dass große, schwere Partikel im Sieb nach unten sinken, da die Schwerkraft hier dominiert. Kleine bzw. leichte Partikel werden von dem Luftstrom nach oben befördert und gelangen in die Leichtfraktion. Partikel, bei denen sich die Kräfte im Gleichgewicht befinden, schweben im Sieb und fallen nach Abschalten des Luftstroms in die Grobfraktion. Durch die spezielle Form des Siebers kommt es außerdem zu einem Strömungsprofil durch das die Partikel beim Aufsteigen oder Absinken gegen die Wände prallen. So können beispielsweise Agglomerate aufgelöst werden.

Die Versuche zur Klassierung mittels Zick-Zack-Sieb wurden im Institut für Aufbereitung und Deponietechnik der Technischen Universität Clausthal an einem Zick-Zack-Sieb der Firma HOSOKAWA-ALPINE durchgeführt [120]. Insgesamt wurden 50 g Ausgangsmaterial in den Sieb aufgebracht. Die erhaltene Leichtfraktion wurde danach erneut aufgegeben. Trotz der mehrmaligen Siebung konnte keine klare Trennung der einzelnen Komponenten erreicht werden. Sowohl in den Grob- als auch in den Feinfraktionen befanden sich noch Polystyrolkugeln. Dies ist darauf zurückzuführen, dass das expandierte Polystyrol zwar eine geringere Dichte als die Papierfasern, aber andere geometrische Abmessungen besitzt. Außerdem haften durch den Trocknungsprozess zum Teil Fasern an den Kugeln und beschwerten diese, sodass sie in die Grobfraktion klassiert werden. Eine sortierende Klassierung mit dem Sieb ist somit nicht erfolgreich und wird nicht weiter betrachtet.

7.1.2.2.2 Trennung im feuchten Zustand

Da die ausgewählten trockenen Klassierverfahren keine Sortierung der einzelnen Komponenten des Spuckstoffes ermöglichten, wurde sich sowohl in der Arbeit von ANSCHÜTZ [120] als auch in der Projektarbeit von ANTONY [119] auf die Trennung im feuchten Zustand bzw. im wässrigen Medium konzentriert.

Trennung im Schwimm-Sink-Verfahren

ANTONY verwendete das Schwimm-Sink-Verfahren an dem noch feuchten Spuckstoff sowie an den getrockneten und zerkleinerten Spuckstoff. Beim Schwimm-Sink-Verfahren wird der Spuckstoff in ein mit Wasser gefülltes Becken eingebracht. Stoffe mit einer Dichte unterhalb der Dichte von Wasser (1 g/cm^3) schwimmen an der Oberfläche. Komponenten mit einer höheren Dichte sinken ab. Die Papierfasern besitzen zwar eine Dichte unterhalb von 1 g/cm^3 , nehmen aufgrund ihrer hydrophilen Endgruppen und ihrer Struktur jedoch Wasser auf und sinken teilweise ab. Trotzdem konnten noch Faseranteile in der Schwimmfraktion gefunden werden. Die Sinkfraktion bestand nach dem ersten Durchlauf bereits nur aus Fasern und Holz. Um das Ausbringen zu erhöhen wurde die Schwimmfraktion insgesamt sieben Mal behandelt.

Das Ausbringen der Sinkfraktion aus den Versuchen mit getrocknetem und zerkleinertem Spuckstoff betrug im Mittel über vier Versuchsreihen 86 %. Im Vergleich mit der manuellen Klaubung, die zur Bestimmung der Zusammensetzung des Spuckstoffes durchgeführt wurde (vgl. Kapitel 5) zeigt sich, dass bei diesem Verfahren über 10% der Fasern in der Schwimmfraktion verbleiben und aussortiert werden. Bei der Verwendung von dem noch feuchten Spuckstoff im ebenfalls siebenstufigen Schwimm-Sink-Verfahren konnte sogar nur ein Ausbringen von 70 % erreicht werden. Die Einsparung des Trocknungs- und Zerkleinerungsschrittes spart zwar Energie und kann potentiell die Verkürzung der Fasern in der Schneidmühle verhindern, führt jedoch auch zu einem geringeren Materialertrag. In wie weit durch diese Form der Aufbereitung und die Abtrennung der Störstoffe eine Verbesserung der Eigenschaften des Verbundwerkstoffes erreicht werden kann, wird in Kapitel 7.2.3 genauer diskutiert.

Trennung durch Kombination mehrerer Verfahren und Konstruktion eines Trennaggregates

Verschiedene Vorversuche im Rahmen der Bachelorarbeit von ANSCHÜTZ [120] zeigten, dass sich zur Abtrennung der Störstoffe vom Fasermaterial eine Kombination aus dem Schwimm-Sink-Verfahren und dem Sieben des Materials im nassen Zustand eignet. Um ein geeignetes Aufbereitungsaggregat zu konstruieren, wurde die Gesamtfunktion in einzelne Teilfunktionen zerlegt. Ein morphologischer Kasten diente zur Ermittlung der Lösungsfunktionen für die einzelnen Teilaufgaben. Diese Funktionen wurden anschließend bewertet, um eine optimale Lösung zu identifizieren. Der aus der gewählten Lösungsvariante resultierende Aufbau ist in Abbildung 7.8 dargestellt.

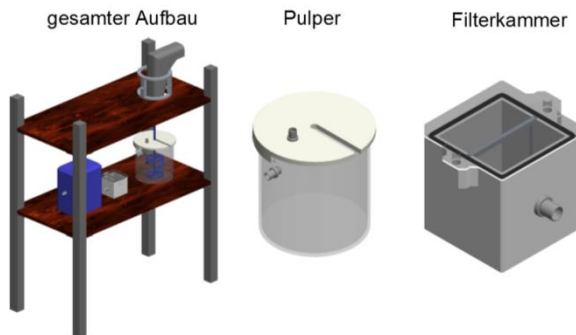


Abbildung 7.8: Entwickelte Konstruktion zur Trennung von Faserstoff und Störstoffen [120]

Eine der beiden Hauptkomponenten bildet dabei ein Plexiglasbehälter mit einem Volumen von 5 Litern, dessen Funktion an die eines aus der Papierindustrie bekannten Pulpers angelehnt ist. Der Pulper wird mit einem Gemisch aus Wasser und Spuckstoff gefüllt. Ein handelsüblicher, in eine Bohrmaschine eingespannter Farbrührer dient zur kontinuierlichen Durchmischung der Komponenten und zur Auflockerung von Faseragglomeraten. Um Materialverluste zu vermeiden, befindet sich auf dem Pulper eine Abdeckung. An der Seite des Pulpers und am Deckel sind zwei

Anschlüsse für Schläuche vorgesehen, die eine Absaugung des Gemisches bzw. eine Zuführung von Prozesswasser ermöglichen. Das Wasser-Spuckstoffgemisch wird mit einer Pumpe in den nächsten Behälter gesaugt. In diesem befindet sich ein austauschbarer Siebeinsatz, sodass die Maschenweite angepasst werden kann. Komponenten, die größer als die Maschenweite sind, bleiben im Sieb hängen, kleinere Komponenten, wie Fasern können das Sieb passieren und werden danach durch die Pumpe in den Pulper zurückgeleitet.

Durch diese Konstruktion konnte eine zuverlässige Abtrennung der Polystyrolkugeln erreicht werden. Diese ging allerdings erneut mit Faserverlusten einher, da sich das Sieb im Laufe des Versuches mit Material zusetzte und dadurch auch kleinere Partikel am Durchtritt gehindert wurden (siehe Abbildung 7.9). Aus diesem Grund ist auch kein kontinuierlicher Betrieb des Aggregates möglich. Das Sieb musste nach jedem Durchgang entnommen und gereinigt bzw. getauscht werden. Außerdem war die Menge des Ausgangsmaterials auf ca. 20 g pro 5 Liter Wasser limitiert, da bei zu viel Ausgangsmaterial das Zusetzen des Siebes schnell von statten geht und die Faserverluste erhöht werden.



Abbildung 7.9: Sieb (ca. 1 mm Maschenweite) nach dem erstem Probelauf pulperseitig (links) und pumpenseitig (rechts) [120]

Die aus dem Pulper erhaltene, aufbereitete Fraktion ist in Abbildung 7.10 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass dieser hauptsächlich aus Papierfasern besteht. Vereinzelt sind noch Holzsplitter vorhanden. Die Reinheit des Materials ist jedoch deutlich höher, als die der vorangegangenen Versuche.



Abbildung 7.10: Mit der entwickelten Konstruktion aufbereiteter Stoff [120]

Insgesamt konnten mit der Konstruktion Fortschritte hinsichtlich der Reinheit des Produkts gegenüber den zuvor erprobten Aufbereitungsverfahren erreicht werden. Trotzdem gibt es Einschränkungen hinsichtlich der Anwendbarkeit des Verfahrens. Für den weiteren Verlauf der Arbeit wurde der so aufbereitete Spuckstoff nicht betrachtet, da eine Hochskalierbarkeit des Verfahrens als nicht wirtschaftlich sinnvoll angesehen wurde. Im großtechnischen Prozess des Altpapierrecyclings könnte eine erneute Einspeisung des Spuckstoffes in den Pulper möglicherweise zu einer besseren Abtrennung der Störstoffe in anderen Aggregaten und einer höheren Faserausbeute für die Papierherstellung führen. Dies müsste jedoch hinsichtlich des ökonomischen und ökologischen Nutzens sowie der erhaltenen Faserlänge genauer betrachtet werden, da hierbei der Spuckstoff möglichst getrennt von anderen Input-Strömen im Umlauf gefahren werden müsste.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass eine mechanische Aufbereitung des Spuckstoffes zur Abtrennung von EPS und Holzsplittern und der Erhalt einer reinen Faserfraktion nur mit Faserverlusten möglich ist. Die besten Ausbeuten erzielen dabei das Schwimm-Sink-Verfahren und das manuelle Klauben, welches jedoch sehr aufwändig ist. In den folgenden Untersuchungen werden daher nur geklaubter Spuckstoff und mittels Schwimm-Sink-Verfahren behandelter Spuckstoff mit dem nicht aufbereiteten Spuckstoff verglichen.

7.1.3 Eigenschaften der Compounds

7.1.3.1 Mechanische Eigenschaften

7.1.3.1.1 Zugeigenschaften

Schwimm-Sink-Verfahren und Zerkleinerung

Die Elastizitätsmodul und die Zugfestigkeiten der Compounds aus PP und z.T. mechanisch behandeltem Spuckstoff sind in Abbildung 7.11 und Abbildung 7.12 dargestellt. Auf der Abszisse befindet sich dabei jeweils der Wert für die in Kapitel 6 betrachteten Spuckstoff-Compounds, bei denen der Spuckstoff nach dem Trocknen zerkleinert wurde. Die Ordinate gibt die Werte für die Compounds aus PP und nicht zerkleinertem Spuckstoff („nicht zerkleinert“) bzw. Spuckstoff aus dem Schwimm-Sink-Verfahren („Schwimm-Sink“) an.

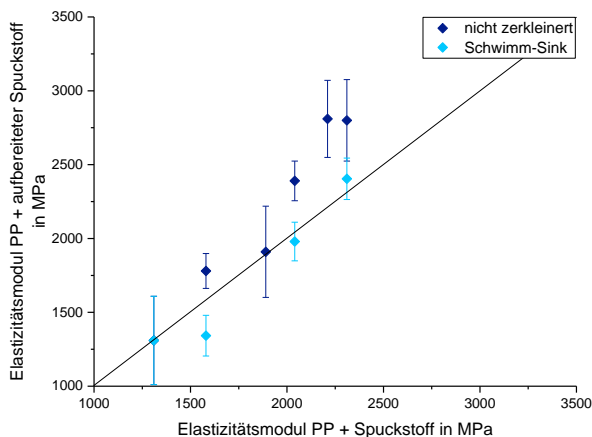


Abbildung 7.11: Elastizitätsmodul der Compounds aus PP und mechanisch behandeltem Spuckstoff in Abhängigkeit des Füllstoffgehaltes

Es ist zu sehen, dass sowohl beim E-Modul, als auch bei der Zugfestigkeit die Mittelwerte der Compounds mit nicht zerkleinertem Spuckstoff oberhalb derer des zerkleinerten Spuckstoffes liegen. Die Aufbereitung im Schwimm-Sink-Verfahren führt hingegen zu einer leichten Abnahme der mechanischen Eigenschaften. Die

Aufbereitung hat somit keinen positiven Einfluss auf die Zugeigenschaften.

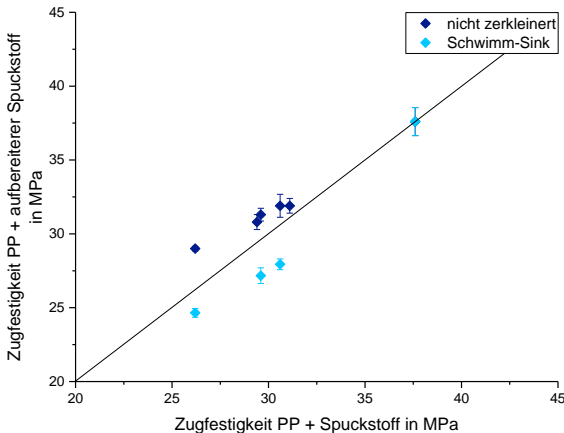


Abbildung 7.12: Zugfestigkeit der Compounds aus PP und mechanisch behandeltem Spuckstoff in Abhängigkeit des Füllstoffgehaltes

Der Verzicht auf die Zerkleinerung des Spuckstoffes führt hingegen zu einer Verbesserung der Steifigkeit und Festigkeit der Compounds. Dies lässt sich auf die Länge der Papierfasern zurückführen. Durch den Zerkleinerungsschritt, der hauptsächlich zum Aufbrechen der Agglomerate dienen sollte, werden die Fasern gekürzt. Diese Reduktion der Länge verringert die Kraftübertragung der Fasern und somit die mechanischen Eigenschaften des Verbundes. Aus dieser Erkenntnis lässt sich ableiten, dass auch mit den anderen in Kapitel 6 betrachteten Matrixsystemen bessere Zugeigenschaften erreicht werden könnten, wenn der nicht zerkleinerte Spuckstoff eingesetzt würde. Eine Diskussion ob der Verzicht des Zerkleinerungsschrittes für die Anwendung sinnvoll ist folgt in Kapitel 7.2.4.

Zusätzlich zum mechanisch aufbereiteten Spuckstoff wurde definiert-kontaminierter Spuckstoff (Zusammensetzungen siehe Abbildung 7.1 in Kapitel 7.1.1), Spuckstoff verschiedener Produktionstage, sowie der mit SOXHLET-Extraktion gereinigte Spuckstoff in PP-Compounds mit jeweils 30 w-% Füllstoffanteil eingesetzt. Die Diskussion der folgenden Ergebnisse ist jeweils in diese drei Versuchsreihen gegliedert. Die Elastizitätsmoduln und die Zugfestigkeiten dieser Compounds sind in Abbildung 7.13 und Abbildung 7.14 dargestellt. Als Referenzen sind jeweils in schwarz das ungefüllte PP und der zerkleinerte Spuckstoff („Standardspuckstoff“), sowie in weiß die durch Klaubung des zerkleinerten Spuckstoffes erhaltene „reine Papierfaser“ angegeben. Zur besseren Vergleichbarkeit wurden der Mittelwert und die Standardabweichung des Standardspuckstoffs als Linien über das gesamte Diagramm extrapoliert.

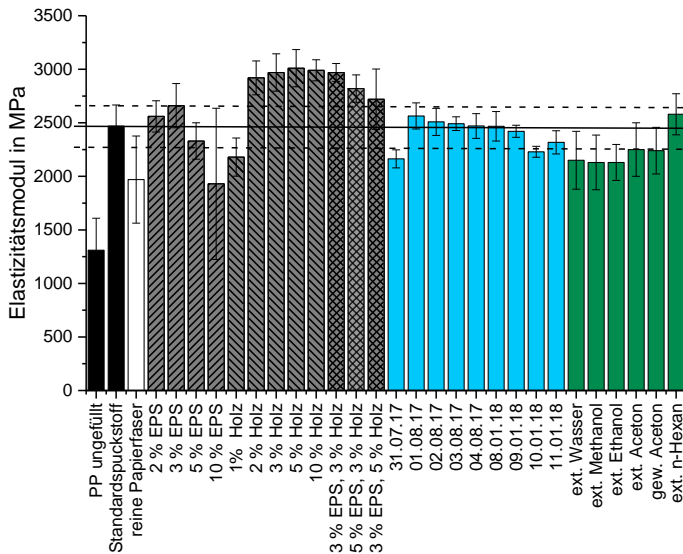


Abbildung 7.13: Elastizitätsmodul der PP-Compounds mit 30 w-% Spuckstoff (kontaminiert, verschiedene Produktionstage, chemisch gereinigt)

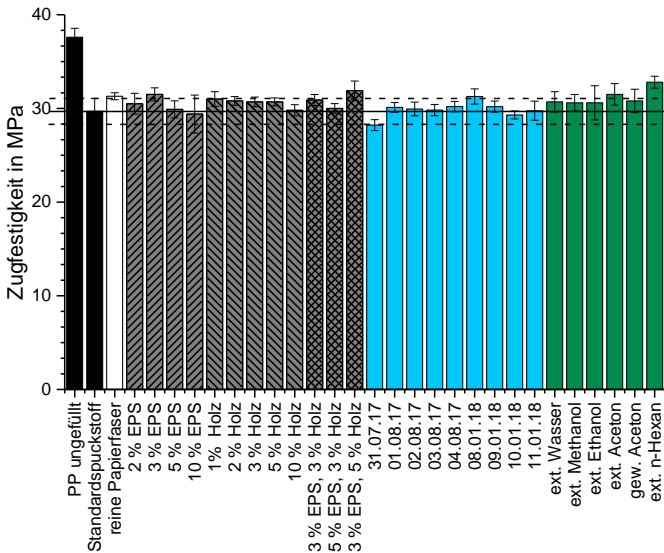


Abbildung 7.14: Zugfestigkeit der PP-Compounds mit 30 w-% Spuckstoff (kontaminiert, verschiedene Produktionstage, chemisch gereinigt)

Kontamination des Spuckstoffes

Die gezielte Kontamination des Spuckstoffes mit EPS und Holz hat je nach Störstoff unterschiedliche Auswirkungen. Die Zugabe von größeren Mengen EPS (<5 w-%) führt zu einer Reduzierung des E-Moduls und in geringem Maße auch der Zugfestigkeit. Bei 10 w-% EPS ist außerdem eine sehr große Standardabweichung der Messwerte zu erkennen. Das EPS schmilzt während der Compoundierung auf und verteilt sich in der Matrix. Da PP und PS nicht ineinander löslich ist, bildet das PS Ausscheidungen in der Matrix, die je nach Verteilung in der Einzelprobe das Bruchverhalten negativ oder positiv beeinflussen.

Durch Zugabe von Holzsplittern steigt der Elastizitätsmodul im Mittel an. Die Zugfestigkeit wird im Rahmen der Messgenauigkeit nicht beeinflusst. Im Vergleich mit den Papierfasern besitzt das Holz eine

höhere Steifigkeit, wodurch auch die Steifigkeit des Compounds erhöht wird.

Bei kombinierter Kontamination mit Holz und EPS heben sich die beobachteten Effekte gegenseitig auf. Es werden E-Moduln und Zugfestigkeiten erhalten, die unter Einbeziehung der Standardabweichung der Messung nur etwas höher sind als die der Ausgangszusammensetzung des Spuckstoffs. Eine ausführliche statistische Betrachtung, die von LÜER [74] durchgeführt wurde, zeigt, dass die Veränderung der Zusammensetzung nur marginalen Einfluss hat.

Spuckstoff verschiedener Produktionstage

Die gezielten Kontaminationen wurden mit vergleichsweise hohen Störstoffanteilen durchgeführt. Manuelle Auszählungen der Zusammensetzung von Stichproben verschiedener Tage (siehe Tabelle 7.4) zeigen, dass der EPS-Gehalt zwischen 0,3 w-% und 0,6 w-% und der Holz-Gehalt zwischen 2,3 w-% und 3,5 w-% schwankt [75]. Damit ist der EPS-Gehalt etwas niedriger, als in der zuvor angenommenen Standardzusammensetzung (0,5 w-%), während der Holzgehalt deutlich oberhalb der zuvor durch LÜER [74] bestimmten 1 w-% liegt. Die Abweichungen ergeben sich wahrscheinlich durch die unterschiedlichen Personen, die die Klaubung durchgeführt haben.

Trotz dieser Unterschiede haben die Schwankungen einen nur geringen Einfluss auf die Zugeigenschaften. Lediglich die Messergebnisse des Compounds mit Spuckstoff vom 31.07.17 weichen geringfügig nach unten ab. Daraus lässt sich schließen, dass in der betrachteten Aufbereitungsanlage einerseits ein Spuckstoff mit relativ konstanter Zusammensetzung erhalten wird und andererseits die vom Input, z.B. durch jahreszeitliche Schwankungen, und der Prozessführung abhängigen Schwankungen für die Zugeigenschaften des Compounds nicht von Bedeutung sind.

Tabelle 7.4: Zusammensetzung des Spuckstoffs an verschiedenen Produktionstagen [75];

Datum	Zusammensetzung in %		
	Fasern	Holz	EPS
31.07.2017	97,3	2,3	0,3
01.08.2017	96,8	2,9	0,3
02.08.2017	95,8	3,5	0,6
03.08.2017	96,5	3,2	0,3
04.08.2017	96,7	2,9	0,4
08.01.2018	96,6	3,0	0,4
09.01.2018	96,5	3,1	0,4
10.01.2018	97,1	2,5	0,4
11.01.2018	96,4	3,2	0,4

SOXHLET-Extraktion

Die Aufbereitung des Spuckstoffs mittels SOXHLET-Extraktion liefert bei den meisten Lösungsmitteln gegenüber dem Ausgangsmaterial keine signifikante Veränderung. Mit absteigender Polarität der Lösungsmittel von Wasser zu n-Hexan ist im Mittel ein Anstieg der Zugfestigkeit und des E-Moduls zu erkennen. Durch die hohen Standardabweichungen lässt sich dieser Trend jedoch nicht sicher bestätigen. Der positive Effekt der Extraktion mit n-Hexan auf die Zugeigenschaften ist jedoch eindeutig. Dies lässt sich auf die Entfernung von Fetten und Wachsen von der Faseroberfläche und von EPS aus dem Füllstoff zurückführen.

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse, dass sowohl eine mechanische, als auch eine chemische Aufbereitung nur geringfügigen Einfluss auf die Zugeigenschaften haben. Die Schwankungen der Zusammensetzung im Produktionsbetrieb sind gering, sodass von einer konstanten Qualität ausgegangen werden kann. Da die vollständige Abtrennung aller Störstoffe mit großem Aufwand

verbunden ist und daraus keine besseren Zugeigenschaften resultieren, ist die Optimierung der Aufbereitung nicht notwendig. Im Bereich der mechanischen Aufbereitung wurde gezeigt, dass der Zerkleinerungsschritt vor der Compoundierung die Zugeigenschaften sogar verschlechtert und somit ggf. eingespart werden sollte.

7.1.3.1.2 CHARPY-Schlagzähigkeit

Die Ergebnisse der Schlagzähigkeitsprüfung der Compounds aus PP und z.T. aufbereitetem Spuckstoff sind in Abbildung 7.15 und Abbildung 7.16 dargestellt. Die Auftragung in Abbildung 7.14 ist identisch zu der der Ergebnisse aus dem Zugversuch in Abbildung 7.11 und Abbildung 7.12 erfolgt.

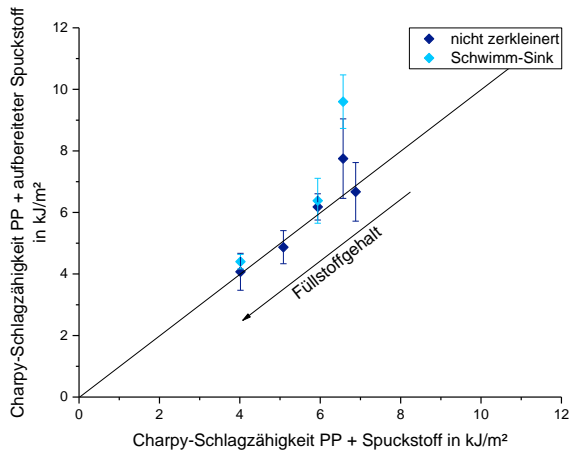


Abbildung 7.15: CHARPY-Schlagzähigkeit der Compounds aus PP und mechanisch behandeltem Spuckstoff in Abhängigkeit des Füllstoffgehaltes

Schwimm-Sink-Verfahren und Zerkleinerung

Bei der mechanischen Aufbereitung ist bei 10 w-% Füllstoffgehalt noch ein Unterschied zwischen den drei Verarbeitungswegen erkennbar. Ab 20 w-% sind die Schlagzähigkeiten jedoch im Rahmen der Messgenauigkeit identisch. Bei geringen Füllstoffgehalten hat

eine Abtrennung von Störstoffen mittels Schwimm-Sink-Verfahren somit einen positiven Einfluss auf die CHARPY-Schlagzähigkeit.

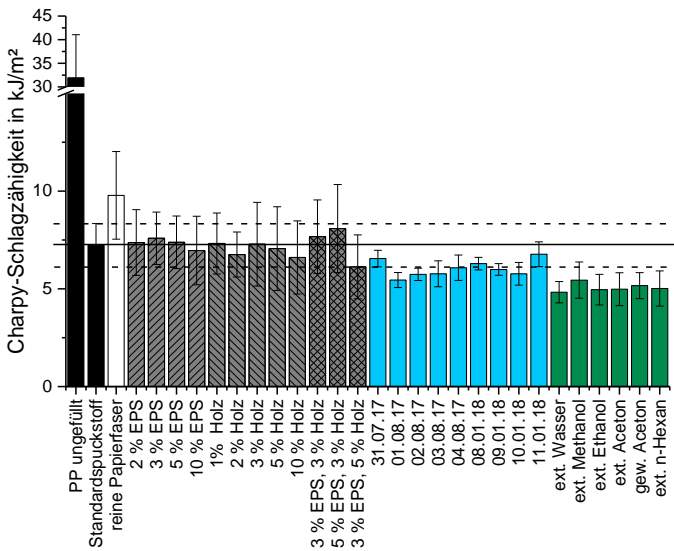


Abbildung 7.16: CHARPY-Schlagzähigkeit der PP-Compounds mit 30 w-% Spuckstoff (kontaminiert, verschiedene Produktionstage, chemisch gereinigt)

Kontamination des Spuckstoffs

Durch die gezielte Kontamination des Spuckstoffes mit EPS und Holz wird die Schlagzähigkeit nur geringfügig beeinflusst. Die Werte sind im Rahmen der Methodengenauigkeit identisch. Die Zugabe von Holz erhöht die Standardabweichung, da sich vermutlich bei einzelnen Proben die Holzsplitter genau im Bruchquerschnitt befinden und hier die Schlagzähigkeit senken, während bei anderen Proben kein Holz an der Bruchstelle vorhanden ist und hier lediglich eine Mischung aus PP und Papierfaser geprüft wird. Bei größeren Probekörpern und Bauteilen würden diese Schwankungen sinken. Im Falle der verwendeten Probekörper vom Typ 1BB machen die Holzsplitter jedoch einen großen Teil des Probenquerschnitts aus (siehe Abbildung 7.17), sodass auch ihr Einfluss auf die gemessenen Eigenschaften größer ist.

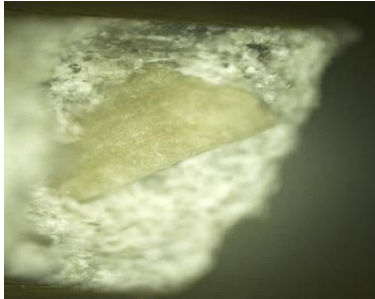


Abbildung 7.17: mikroskopische Aufnahme einer Probe mit 5 w-% EPS und 3 w-% Holz

Spuckstoff verschiedener Produktionstage

Die Messergebnisse der Compounds mit Spuckstoff verschiedener Produktionstage liegen etwas unterhalb des Standardspuckstoffes. Da die Zusammensetzungen nicht deutlich voneinander abweichen und es innerhalb der Messserie keine signifikanten Schwankungen gibt, ist dies auf einen Offset in der Serie zurückzuführen.

SOXHLET-Extraktion

Die chemische Behandlung des Spuckstoffes liefert verglichen mit dem Standardspuckstoff ebenfalls geringere Schlagzähigkeiten. Durch die Extraktion mit organischen Lösungsmitteln werden unter anderem das EPS sowie Fette und Wachse entfernt. Diese Stoffe wirken in der Kunststoffmatrix als Weichmacher und erhöhen somit die Schlagzähigkeit. Das EPS, das wie bereits beschrieben nicht kompatibel mit der PP-Matrix ist, bildet zusätzlich Ausscheidungen, die ähnlich wie Gummipartikel die Schlagenergie aufnehmen können [122].

Vollständige Abtrennung von Störstoffen

Die höchste Schlagzähigkeit der gefüllten Systeme zeigt das Compound in dem nur Papierfasern enthalten sind. Dies bestätigt das Ergebnis aus dem Schwimm-Sink-Verfahren, dass die Abtrennung von Störstoffen zu einer leichten Verbesserung der

Schlagzähigkeit führt. Wie jedoch in 7.1.2 gezeigt wurde, ist eine vollständig gereinigte Faserfraktion nur durch manuelle Klaubung zu erhalten. Außerdem ist in Frage zu stellen, ob der Aufwand zur vollständigen Abtrennung gerechtfertigt ist, wenn mit dem ungefüllten PP ca. die dreifache Schlagzähigkeit erreicht wird. Dies gilt es im jeweiligen Anwendungsfall weiter zu diskutieren.

7.1.3.2 Thermische Eigenschaften

7.1.3.2.1 Schmelz- und Kristallisationsverhalten

Bei den vorangegangenen Untersuchungen der Spuckstoff-Compounds (siehe Kapitel 6) hat sich gezeigt, dass der Spuckstoff selbst nicht kristallin ist und mittels DSC-Messungen nur das Schmelz- und Kristallisationsverhalten der Matrix analysiert werden kann. Dies wurde u.a. auch von ANTONY bestätigt [119], der keine Änderungen der Schmelztemperatur und der Schmelztemperatur bei Compounds aus nicht aufbereitetem und mit dem Schwimm-Sink-Verfahren behandeltem Spuckstoff feststellen konnte.

Kontamination des Spuckstoffs

Da EPS als einer der mengenmäßig häufig auftretenden Störstoffe in der DSC-Messung einen Schmelzpunkt oder zumindest einen Glasübergangspunkt zeigen sollte, wurde bei der gezielten Kontamination besonderes Augenmerk auf dessen DSC-Kurven gelegt (Abbildung 7.18).

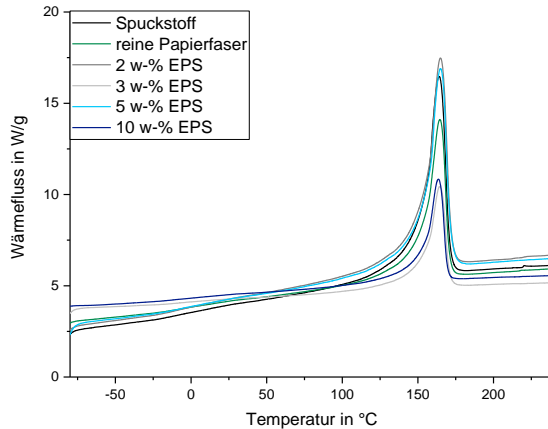


Abbildung 7.18: zweite Aufheizkurve der Compounds aus PP und 30 w-% Spuckstoff, der z.T. gereinigt oder gezielt mit EPS kontaminiert wurde

Entgegen der Erwartung lässt sich kein deutlicher Unterschied zwischen den Kurven erkennen. Der Schmelzpeak ist teilweise etwas höher oder niedriger, wobei allerdings kein Trend feststellbar ist. Gleiches gilt für die gezielt mit Holz kontaminierten Compounds deren zweite Aufheizkurve in Abbildung 12.20 im Anhang dargestellt ist.

Aus diesen Ergebnissen lässt sich ableiten, dass auch Produktionsschwankungen keine Auswirkungen auf das Schmelz- und Kristallisationsverhalten haben, sodass auf Messungen hierzu verzichtet wurde.

Soxhlet-Extraktion

Ein Ausschnitt der DSC-Kurven der Compounds aus PP und mittels Extraktion gereinigtem Spuckstoff ist in Abbildung 12.21 im Anhang abgebildet. Die Kurven besitzen alle denselben Verlauf und annähernd dieselbe Schmelztemperatur. Leicht schwankende Schmelzenthalpien resultieren vorwiegend aus der unterschiedlichen Basislinie. Insgesamt bewirkt die SOXHLET-Extraktion des

Spuckstoffes somit ebenfalls keine deutliche Änderung des Schmelz- und Kristallisationsverhaltens.

7.1.3.2.2 Thermische Zersetzung

In wie weit die Veränderung der Spuckstoffzusammensetzung die thermische Zersetzung der Compounds beeinflusst ist in den TGA-Kurven und ihren Ableitungen in Abbildung 7.19 für die mechanische Aufbereitung und in Abbildung 7.20 für die gezielte Kontamination zu sehen.

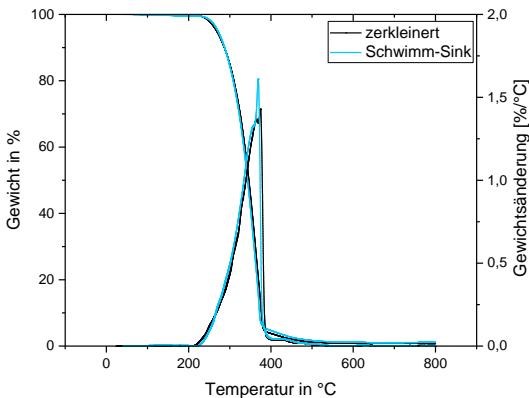


Abbildung 7.19: TGA-Kurve der Compounds aus PP und 30 w-% zerkleinertem bzw. im Schwimm-Sink-Verfahren aufbereitetem Spuckstoff

Schwimm-Sink-Verfahren und Zerkleinerung

Die mechanische Aufbereitung mittels Schwimm-Sink-Verfahren hat keinen Einfluss auf die Beständigkeit bei höheren Temperaturen. Die Kurven der Compounds mit zerkleinertem Spuckstoff und mit aufbereitetem Spuckstoff verlaufen nahezu identisch. Durch das Schwimm-Sink-Verfahren werden zwar Störstoffe abgetrennt, diese machen jedoch nur einen kleinen Gewichtsanteil des Spuckstoffes aus, sodass im Compound keine Veränderung mehr erkennbar ist.

Kontamination des Spuckstoffs

Anders sieht es bei der gezielten Zugabe von Störstoffen aus. Am Beispiel verschiedener Gehalte Holz ist zu sehen, dass die TGA-Kurven stark variieren. Ein klarer Trend in Abhängigkeit des Holzanteils ist jedoch nicht zu erkennen. Dies liegt daran, dass die Kontamination nicht homogen in der Matrix verteilt ist. Bei der Probenahme für die TGA-Messung kann es dazu kommen, dass mehr oder weniger, als der eingestellte Holzgehalt in der Stichprobe enthalten ist. Somit ist eine Vergleichbarkeit nicht gegeben. Für EPS als Störstoff, sowie die Proben der unterschiedlichen Produktionstage gilt dies analog.

Die TGA-Kurven der Compounds mit per Extraktion gereinigtem Spuckstoff liegen im Rahmen der Messgenauigkeit direkt übereinander, sodass auf eine Darstellung an dieser Stelle verzichtet wird.

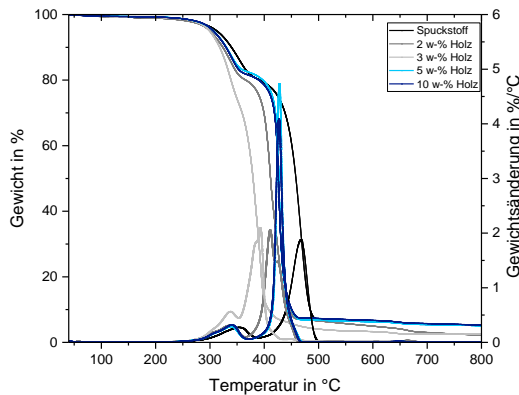


Abbildung 7.20: TGA-Kurven der Compounds aus PP und 30 w-% Spuckstoff mit unterschiedlichen Holzgehalten

7.1.3.2.3 Fließverhalten

Die Viskositätskurven der Compounds aus PP und zerkleinertem bzw. nicht zerkleinertem Spuckstoff sind in Abbildung 12.22 im Anhang dargestellt. Für eine bessere Übersichtlichkeit wurde erneut

die Viskosität bei einer Winkelgeschwindigkeit von 100 rad/s in Abhängigkeit des Füllstoffgehaltes aufgetragen (Abbildung 7.21).

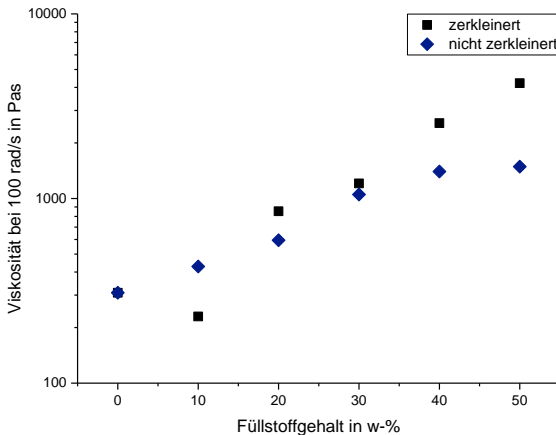


Abbildung 7.21: Viskosität der Compounds aus zerkleinertem und nicht zerkleinertem Spuckstoff und PP bei 100 rad/s in Abhängigkeit des Füllstoffgehaltes

Bei 10 w-% Füllstoffgehalt besitzt das Compound mit nicht zerkleinertem Spuckstoff eine höhere Viskosität, als das mit zerkleinertem Spuckstoff. Im Gegensatz dazu sind bei 30 w-% und 50 w-% die Compounds mit zerkleinertem Spuckstoff höher viskos.

Um eine eindeutigere Aussage über den Zusammenhang von Zerkleinerung und Viskosität treffen zu können, werden zur weiteren Diskussion die Fließweglängen in Abhängigkeit des Füllstoffgehaltes und des Einspritzdruckes in Abbildung 7.22 herangezogen.

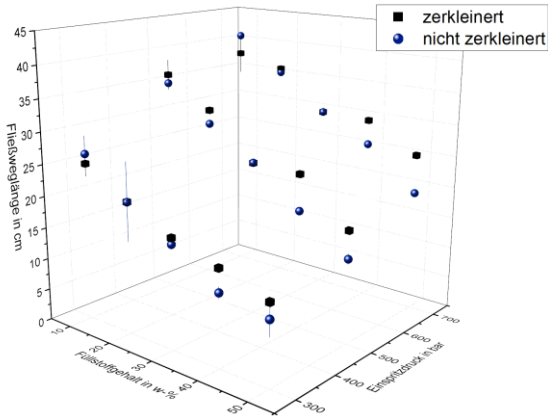


Abbildung 7.22: Fließweglänge der Compounds mit PP und zerkleinertem bzw. nicht zerkleinertem Spuckstoff in Abhängigkeit vom Füllstoffgehalt und vom Einspritzdruck

Bei geringen Füllstoffgehalten ist zwischen den beiden Aufbereitungszuständen des Spuckstoffes kein Unterschied zu erkennen. Ab 40 w-% zeigen die Compounds mit zerkleinertem Spuckstoff größere Fließweglängen und damit eine geringere Viskosität. Dies widerspricht jedoch einem Teil der Ergebnisse der Rheometermessungen.

Um diesen Widerspruch aufzulösen, wurden auch aus den anderen in Kapitel 6.1 und 6.2 verwendeten Matrixsysteme Compounds mit nicht zerkleinertem Spuckstoff hergestellt und auf ihre Fließeigenschaften hin untersucht. Die Viskositätskurven sind in Abbildung 12.23 bis Abbildung 12.32 dargestellt.

Die Viskositätskurven der Compounds mit zerkleinertem und nicht zerkleinertem Spuckstoff sind bei fast allen Matrixmaterialien nahezu identisch. Für den nicht zerkleinerten Spuckstoff sind die Werte etwas geringer. Dieser Trend wird durch die bestimmten Fließweg-

längen bestätigt, da die Fließweglängen hierbei größer sind, was einer geringeren Viskosität entspricht.

Der zerkleinerte und der nicht zerkleinerte Füllstoff unterscheiden sich hauptsächlich in ihrer Faserlänge. Durch die längeren Fasern im nicht zerkleinerten Füllstoff kommt es zu einer höheren Scherung im Material. Die Fasern wirken als Scherebenen, sodass der Kunststoff flüssiger wird. Obwohl dieser Effekt nur gering ist, resultiert daraus trotzdem, dass die Zerkleinerung des Spuckstoffes keinen positiven Einfluss auf die Fließfähigkeit des Materials hat und somit theoretisch auf sie verzichtet werden kann.

Spuckstoff verschiedener Produktionstage

Die Viskositätskurven der Compounds mit PP und Spuckstoff verschiedener Produktionstage sind in Abbildung 7.23 dargestellt. Als Vergleich wurden zusätzlich der in den Untersuchungen in Kapitel 6 verwendete Spuckstoff sowie durch Klaubung abgetrennte Papierfasern ohne weitere Störstoffe verwendet. Der Füllstoffgehalt liegt jeweils bei 30 w-%.

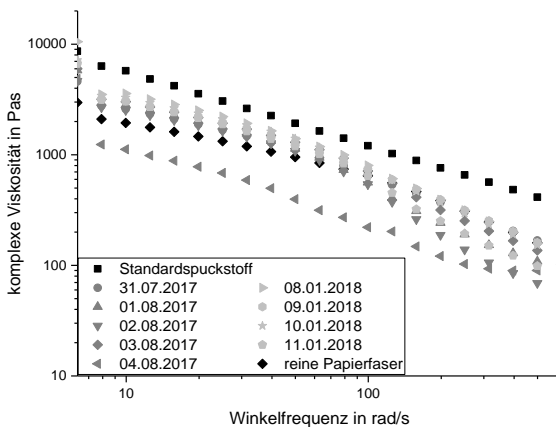


Abbildung 7.23: Viskositätskurven der Compounds mit PP und Spuckstoff verschiedener Produktionstage sowie vollständig von Störstoffen befreiten Papierfasern

Es ist zu sehen, dass die Viskositätskurven des Spuckstoffes unterschiedlicher Produktionstage nah beieinander liegen. Lediglich das Compound mit Spuckstoff vom 04.08.2017 weicht hiervon signifikant ab. Im Vergleich mit dem Standardspuckstoff sind die Viskositäten alle geringer. Die Viskositätskurve des Compounds mit der reinen Papierfaser liegt im selben Bereich, wie die der verschiedenen Tage. Die Unterschiede zwischen den Kurven sind vermutlich auf Inhomogenitäten in den Proben zurückzuführen und lassen keinen Trend erkennen.

Zusammenfassend lässt sich somit sagen, dass weder die produktionsbedingten Schwankungen der Zusammensetzung, noch die vollständige Abtrennung aller Störstoffe einen Einfluss auf das Fließverhalten der Compounds haben.

7.1.4 Kostenabschätzung und Anwendungsbeurteilung

Die vorgestellten Ergebnisse zeigen, dass bei dem betrachteten Spuckstoff weder die chemische, noch die mechanischen Aufbereitungstechniken signifikante Änderungen in den Eigenschaften hervorbringen. Da jeder weitere Aufbereitungsschritt mit zusätzlichen Kosten verbunden ist, ist die Aufbereitung daher weder aus wirtschaftlicher, noch aus materialwissenschaftlicher Sicht sinnvoll.

Abweichungen in den Eigenschaften treten erst auf, wenn deutlich mehr Störstoffe im Spuckstoff vorhanden sind, als üblich. Die Untersuchungen des Spuckstoffs verschiedener Produktionstage zeigen, dass die real auftretenden Schwankungen minimal sind. Der Recyclingprozess läuft in der betrachteten Papierfabrik stabil genug, um auf eine weitere Aufbereitung zu verzichten. In anderen Recyclinganlagen, bei denen stärkere Schwankungen der Zusammensetzung auftreten, könnte eine weitere Behandlung des Spuckstoffes lohnenswert sein. Dies wäre im Einzelfall genauer zu betrachten.

Die Ergebnisse von zerkleinertem und nicht zerkleinertem Spuckstoff zeigen außerdem, dass auf die Zerkleinerung verzichtet werden

kann ohne einen negativen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften oder die Fließfähigkeit zu bewirken.

Für die Hochskalierung in einen industriellen Maßstab wäre eine Pelletierung sinnvoll, wie sie bereits von TILCH et al. [57] und ENGELHARDT und SCHRÖDER [91] vorgeschlagen wurde, um die Dosierung und den Einzug in den Extruder zu vereinfachen. Statt der Zerkleinerung des Spuckstoffes nach der Trocknung würde somit eine feuchte Pelletierung vor der Trocknung betrachtet:

Bei der Pelletierung ändert sich der Wassergehalt nicht, sodass die Trocknungskosten als identisch angenommen werden könnten. Die Kostenberechnung für die Pelletierung ist in Abbildung 7.24 genauer aufgeschlüsselt.

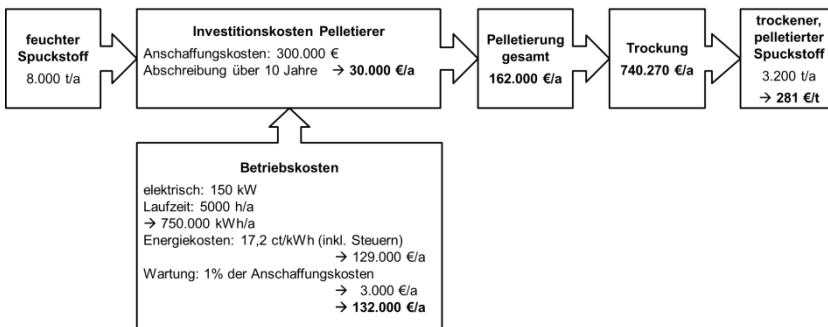


Abbildung 7.24: Berechnung der Kosten zur Pelletierung und Trocknung des Spuckstoffs nach [91]

Bezogen auf den getrockneten Spuckstoff fallen durch die Pelletierung zusätzliche Kosten von ca. 50 €/t an. Zusammen mit der Trocknung ergeben sich für den getrockneten und pelletierten Spuckstoff in Höhe von 281 €/t. Diese liegen oberhalb der Kosten für den zerkleinerten und getrockneten Spuckstoff (266 €/t).

Aus wirtschaftlicher Sicht birgt die Zerkleinerung gegenüber der Pelletierung nur wenig Nutzen (ca. 5% Kostenersparnis). Prozesstechnisch ist die Pelletierung von Vorteil, da hier sowohl die definierte Dosierung, als auch das Handling verbessert würden. Für potentielle Kunden hätte das Angebot eines pelletierten Spuckstoffs

klare Vorzüge, sodass auch der etwas höhere Preis akzeptierbar wäre. Da auf die bisher betrachteten Kosten für Trocknung und Pelletierung noch weitere Kosten aufgeschlagen werden, kann die Differenz von 15 €/t theoretisch vom Deckungsbeitrag abgezogen werden, sodass weiter von einem Verkaufspreis von 350 €/t ausgegangen werden kann. Alle weiteren Verarbeitungsschritte bis hin zum Bauteil sowie die vorgeschlagenen Anwendungen sind analog zu Kapitel 6.1.4.

7.2 Eigenschaftsoptimierung durch Zugabe von Additiven

7.2.1 Ausgangsmaterialien

Wie in den vorausgegangenen Kapiteln gezeigt wurde, ist die Haftung zwischen PP und lignocellulosischen Fasern, wie Naturfasern und den Fasern des Spuckstoffs, nicht optimal. In den letzten Jahrzehnten wurde viel im Bereich der Optimierung der Faser-Matrix-Haftung, vor allem in Bezug auf naturfaserverstärkte Kunststoffe, geforscht [72, 128-132]. Insbesondere die Erprobung und Entwicklung von Haftvermittlern hat sich als zielführend erwiesen. Ein solcher Haftvermittler ist maleinsäureanhydridgepfropftes Polypropylen (MAPP). Wie aus dem Namen zu erkennen ist, handelt es sich hierbei um ein Polypropylenmolekül, an dessen Kette Maleinsäureanhydrid-Moleküle angebunden wurden (siehe Abbildung 2.18).

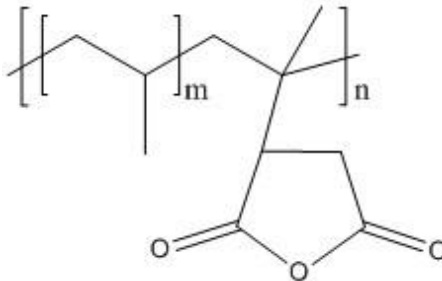


Abbildung 7.25: Chemische Struktur von MAPP [72]

MAPP wird zur Haftvermittlung zwischen PP und Fasern eingesetzt, an deren Oberfläche Hydroxylgruppen (OH-Gruppen) vorliegen. Die Maleinsäureanhydrid-Gruppe reagiert während der Verarbeitung mit den OH-Gruppen (siehe Abbildung 2.19), sodass die Faser mit dem MAPP umhüllt wird. Das PP-Rückgrat des MAPP wechselwirkt mit dem PP über Nebervalenzkräfte und fügt sich so optimal in die Matrix ein.

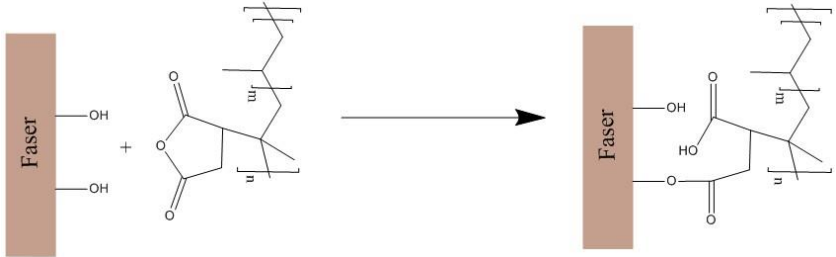


Abbildung 7.26: Reaktion von MAPP mit Naturfasern [72]

Das im Rahmen dieser Arbeit verwendete MAPP stammt von der Firma Kometra (BYK) und wird unter der Bezeichnung SCONA[®] TPPP 8012 FA vertrieben. Der MFR des MAPP ist 50 g / 10 min bis 100 g / 10 min. Der Maleinsäureanhydridgehalt liegt bei $\geq 0,9\%$ [133]. Als Matrixsystem wurde das in Kapitel 6.1 eingeführte PP-Neumaterial verwendet.

7.2.2 Verarbeitung

Die Herstellung und Verarbeitung der Compounds erfolgte analog zu der in Kapitel 6.1.2 beschriebenen Verarbeitung. Der einzige Unterschied dazu ist die Zugabe von MAPP in unterschiedlichen Gewichtsanteilen während des Aufschmelzens der Matrix im Knetter. Die genauen Probenzusammensetzungen sind in Tabelle 7.5 dargestellt. Dabei wird in zwei Probenserien unterschieden: Eine Serie mit variablem Anteil MAPP (PP/0,1x MAPP), der sich nach dem Füllstoffanteil richtet und eine Serie mit konstantem MAPP-Anteil von 3 w-% (PP/3 MAPP). Der konstante Anteil wurde gewählt, da er sich in vorherigen Untersuchungen [134] als zielführend erwiesen hat. Der mit dem Füllstoffgehalt linear ansteigende MAPP-Gehalt wurde gewählt, da mehr Fasern absolut mehr OH-Gruppen bedeuten, die mit den funktionellen Gruppen des MAPP reagieren können.

Tabelle 7.5: Probenzusammensetzungen der Compounds aus Spuckstoff, PP und MAPP

	Spuckstoff in w-%	MAPP in w-%	PP in w-%
PP/0,1x MAPP	10	1	89
	20	2	78
	30	3	67
	40	4	56
	50	5	45
	60	6	34
PP/3 MAPP	10	3	87
	20	3	77
	30	3	67
	40	3	57
	50	3	47
	60	3	37

7.2.3 Eigenschaften der Compounds

7.2.3.1 Mechanische Eigenschaften

7.2.3.1.1 Zugeigenschaften

Die Elastizitätsmoduln der Compounds aus Spuckstoff, PP und MAPP sind in Abbildung 7.27 gegen die Elastizitätsmoduln der Compounds aus Spuckstoff und PP ohne MAPP aufgetragen.

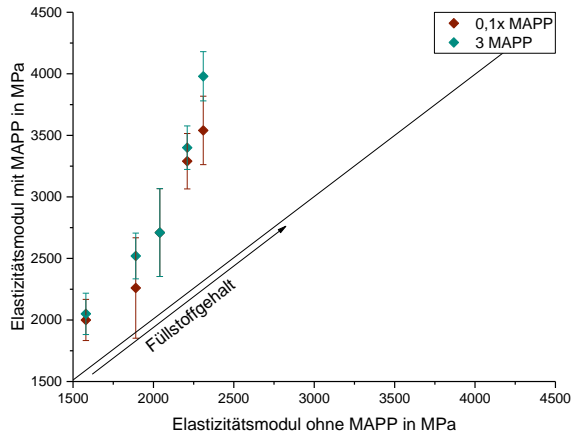


Abbildung 7.27: Elastizitätsmodul der Compounds mit PP und MAPP in Abhängigkeit vom Füllstoffgehalt

Es ist zu erkennen, dass der Elastizitätsmodul bei allen Probenserien mit zunehmendem Füllstoffgehalt ansteigt. Im Rahmen der Messgenauigkeit sind die Werte der beiden Serien mit Haftvermittler als gleich zu erachten, wenngleich die Mittelwerte der Serie mit relativ zum Füllstoff zugesetztem Haftvermittler etwas geringer sind.

Daraus lässt sich schließen, dass die Zugabe des MAPP einen positiven Einfluss auf die Steifigkeit der Compounds hat, die in der Verbesserung der Faser-Matrix-Haftung begründet ist. Diese wird durch die Zugfestigkeiten in Abbildung 7.28 weiter bestätigt. Während bei der Serie ohne Haftvermittler die Zugfestigkeit (schwarze Markierung) mit Zugabe des Spuckstoffes abnimmt, steigt sie bei den mit Haftvermittler versetzten Proben leicht an. Erst bei Füllstoffgehalten >50 w-% fällt die Zugfestigkeit der Compounds mit MAPP unter die des ungefüllten PP.

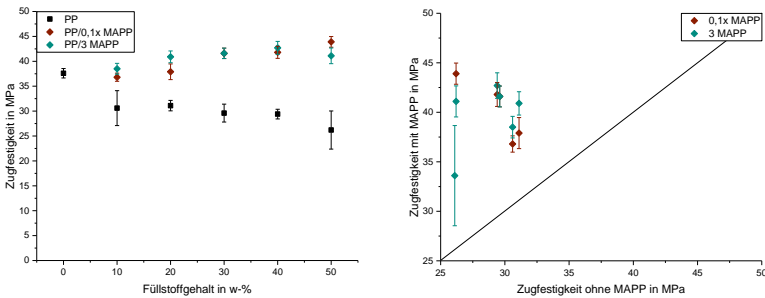


Abbildung 7.28: Zugfestigkeit der Compounds mit PP und MAPP in Abhängigkeit vom Füllstoffgehalt (links) und gegen die Zugfestigkeit ohne MAPP aufgetragen (rechts)

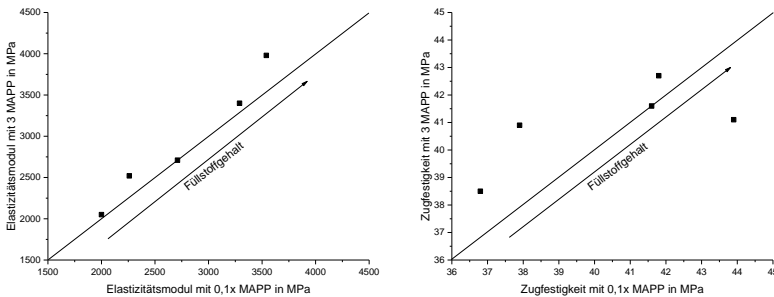


Abbildung 7.29: Elastizitätsmodul und Zugfestigkeit der Compounds mit unterschiedlichen Gehalten MAPP im Vergleich

Der direkte Vergleich der unterschiedlichen Konzentrationen an MAPP (Abbildung 7.29) zeigt, dass der Elastizitätsmodul bei der Serie mit 3 w-% MAPP für alle Füllstoffgehalte besser ist, als bei der anteiligen Zugabe von MAPP.

Bis 20 w-% besitzen die Compounds mit konstant 3 w-% MAPP geringfügig bessere Zugfestigkeiten. Bei 40 w-% ist die Zugfestigkeit als nahezu identisch anzusehen, während bei 50 w-% Füllstoffanteil die anteilige Mischung bessere Werte liefert. Daraus lässt sich schließen, dass ein höherer prozentualer Anteil MAPP als 10 % des Füllstoffanteils zu höheren Zugfestigkeiten führen würde. In wie weit

sich eine weitere Erhöhung des MAPP-Anteils aus Kosten-Nutzen-Sicht lohnen würde, wird in Kapitel 7.2.4 näher diskutiert.

Die maximale Dehnung der Compounds in Abhängigkeit vom Füllstoffgehalt ist Abbildung 12.33 im Anhang zu entnehmen. Da die Standardabweichungen verhältnismäßig groß sind, können zwischen den drei Probenserien keine eindeutigen Unterschiede festgestellt werden. Der durch die kürzeren Ketten des MAPP zu erwarten gewesene Anstieg der maximalen Dehnung wird durch die Anbindung an die Fasern des Spuckstoffes ausgeglichen.

7.2.3.1.2 CHARPY-Schlagzähigkeit

Die CHARPY-Schlagzähigkeit der Compounds mit MAPP ist in Abbildung 7.30 gegen die zugehörigen Werte der Messreihe ohne MAPP aufgetragen. Es ist eine klare Zunahme der Schlagzähigkeit durch Zugabe des Haftvermittlers zu erkennen. Bei geringen Füllstoffgehalten besitzen die Proben mit 3 w-% MAPP die höheren Schlagzähigkeiten, während bei 30 w-% und 40 w-% die Mittelwerte identisch sind und ab 50 w-% die Proben mit dem prozentual zum Füllstoffanteil am schlagzähsten sind.

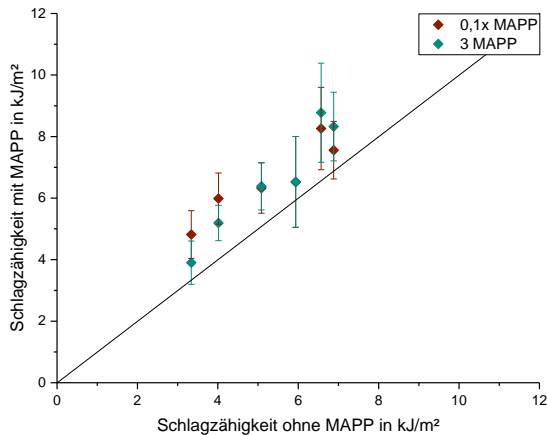


Abbildung 7.30: CHARPY-Schlagzähigkeit der Compounds mit PP und MAPP in Abhängigkeit vom Füllstoffgehalt

Wie bereits bei der Zugfestigkeit kann daraus geschlossen werden, dass mehr als 10 % des Füllstoffgehaltes an MAPP benötigt werden, um eine optimale Verstärkung zu erreichen. Die Standardabweichungen der beiden Probenserien mit MAPP überlappen sich allerdings meist, sodass die Unterschiede, die durch die unterschiedlichen Anteile von MAPP erreicht werden, marginal sind.

7.2.3.2 Thermische Eigenschaften

7.2.3.2.1 Schmelz- und Kristallisationsverhalten

In Abbildung 7.31 sind die Schmelztemperaturen und die normierten Schmelzenthalpien der Compounds aus PP, Spuckstoff und unterschiedlichen Gehalten an MAPP dargestellt. Die Schmelztemperaturen variieren nur im Rahmen der Messgenauigkeit und können für alle drei betrachteten Messreihen als über den Füllstoffgehalt konstant angesehen werden.

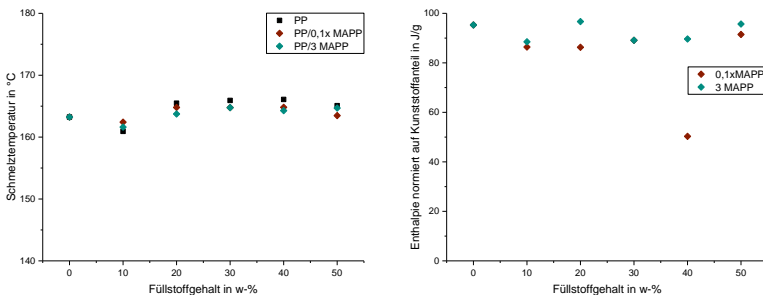


Abbildung 7.31: Schmelztemperatur und normierte Schmelzenthalpie der Compounds mit PP und MAPP in Abhängigkeit des Füllstoffgehalts

Die Schmelzenthalpie nimmt mit steigendem Füllstoffgehalt nahezu linear ab, da der Kunststoffanteil ebenfalls sinkt. Die normierte Schmelzenthalpie ist somit beinahe konstant. Die Abweichungen zwischen den Werten mit und ohne MAPP sind klein. Größere Ausreißer, wie die Schmelzenthalpie des Compounds aus 56 w-% PP, 40 w-% Spuckstoff und 4 w-% MAPP sind auf

inhomogene Proben zurückzuführen. Der Gewichtsanteil des Haftvermittlers MAPP hat somit keinen Einfluss auf das Schmelz- und Kristallisationsverhalten der Compounds.

7.2.3.2.2 Thermische Zersetzung

Vor der Betrachtung der thermischen Zersetzung der Compounds ist es notwendig die Zersetzung des Haftvermittlers zu betrachten. Diese kann Abbildung 7.32 entnommen werden. In der TGA-Kurve sind zwei Zersetzungsstufen zu erkennen, wobei sich die erste Stufe bei Betrachtung der nach der Temperatur abgeleiteten TGA-Kurve in zwei sich überlagernde Vorgänge aufteilen lässt. Die Zersetzung beginnt bei ca. 200 °C.

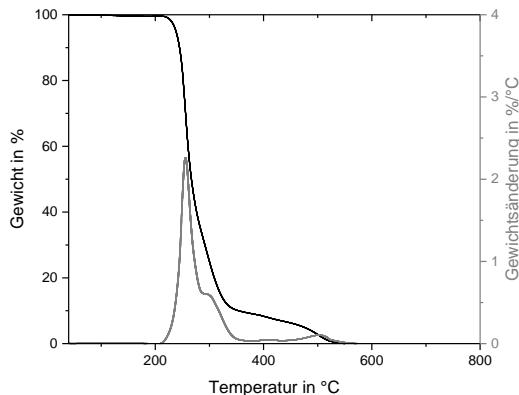


Abbildung 7.32: TGA-Kurve und abgeleitete TGA-Kurve des MAPP

Abbildung 7.33 und Abbildung 7.34 zeigen beispielhaft die TGA-Kurven und die abgeleiteten TGA-Kurven ausgewählter Compounds mit 3 w-% MAPP. Die Kurven für die Messreihe PP/0,1x MAPP befinden sich im Anhang. Als Referenz ist jeweils das ungefüllte PP abgebildet. Wie schon in den vorangegangenen Untersuchungen in Kapitel 6 vorgestellt, verschiebt sich die TGA-Kurve durch Zugabe des Spuckstoffes leicht zu niedrigeren Temperaturen. Die Masseabnahme der zweiten Zersetzungsstufe des PP um 400 °C nimmt

gleichzeitig zu. Durch die Zugabe des MAPP tritt eine weitere Zersetzungsstufe auf, die vor allem in den abgeleiteten TGA-Kurven als Peak zwischen 200 °C und 300 °C erkennbar ist. Außerdem findet bei über 600 °C eine neue Zersetzung auf, bei der wahrscheinlich Produkte aus dem vorherigen chemischen Abbau des an den Spuckstoff angebundenen MAPP weiter zersetzt werden.

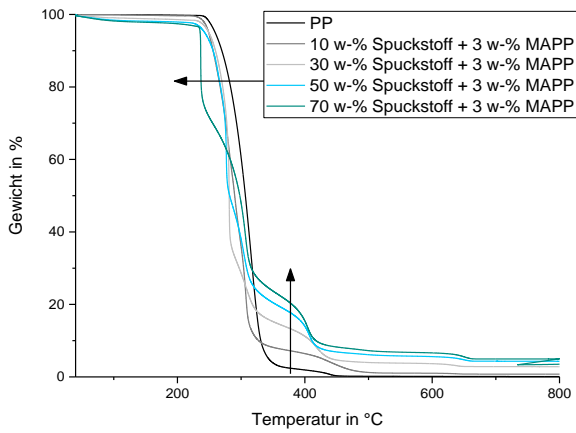


Abbildung 7.33: TGA-Kurven der Compounds mit 3 w-% MAPP

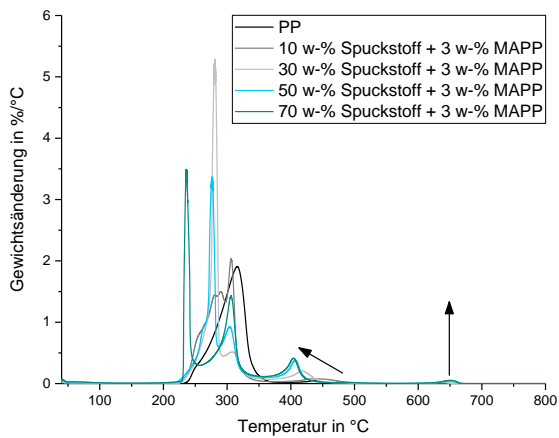


Abbildung 7.34; abgeleitete TGA-Kurven der Compounds mit 3 w-% MAPP

In Abbildung 7.35 ist zu erkennen, dass die thermische Zersetzung der Compounds mit MAPP bei tieferen Temperaturen beginnt, als bei Compounds, die nur aus Spuckstoff und PP bestehen. Der Vergleich der beiden Messreihen mit unterschiedlichen MAPP-Gehalten untereinander zeigt, dass Unterschiede in der thermischen Zersetzung nur bei niedrigen Temperaturen unter 300 °C bestehen. Die Proben, denen anteilig zum Spuckstoffgehalt MAPP zugesetzt wurde, zersetzen sich tendenziell früher. Vor allem bei 50 w-% Spuckstoff und 5 w-% MAPP ist deutlich die erste Zersetzungsstufe, die hauptsächlich vom MAPP hervorgerufen wird, zu erkennen. Es handelt sich dabei sehr wahrscheinlich nicht um die Reaktion von ungebunden in der Matrix vorliegendem MAPP, sondern von an den Spuckstoff angebindenem MAPP, da diese Stufe auch bei 50 w-% Spuckstoff und 3 w-% MAPP ausgeprägt ist, wenn auch erst bei höheren Temperaturen.

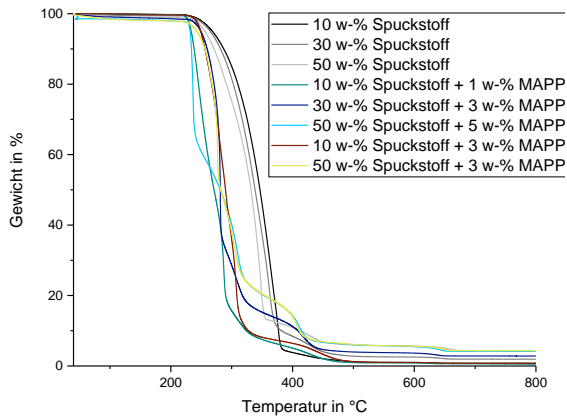


Abbildung 7.35: TGA-Kurven ausgewählter Compounds der Messreihen PP ohne MAPP, PP/0,1x MAPP und PP/3 MAPP

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Zugabe von MAPP die thermische Zersetzung der Compounds begünstigt. Bei der Verarbeitung ist daher darauf zu achten, die Verarbeitungstemperaturen nicht zu hoch anzusetzen. Im üblichen Verarbeitungs-

bereich für Compounds aus PP und MAPP bis 250 °C ist keine signifikante thermische Zersetzung zu beobachten.

7.2.3.2.3 Fließverhalten

Das Fließverhalten der Compounds mit MAPP als Haftvermittler wurde anhand von Rheometer-Messungen und mittels Herstellung von Fließspiralen charakterisiert. Die Viskositätskurven ausgewählter Compounds sind in Abbildung 12.36 im Anhang dargestellt. Die daraus abgeleiteten Viskositäten bei einer Winkelgeschwindigkeit von 100 rad/s sind in Abbildung 7.36 aufgetragen.

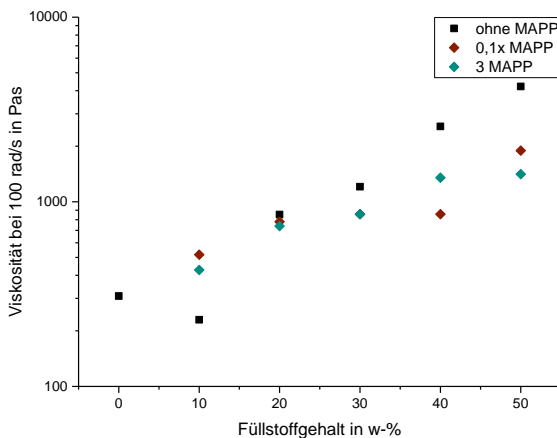


Abbildung 7.36: Viskositäten der Compounds mit und ohne MAPP bei 100 rad/s in Abhängigkeit vom Füllstoffgehalt

Es ist zu sehen, dass bei 10 w-% Spuckstoff die beiden Messreihen mit MAPP eine höhere Viskosität besitzen, als das Compound ohne MAPP. Mit 1 w-% MAPP wird eine geringfügig höhere Viskosität erzielt, als mit 3 w-% MAPP. Der Überschuss an MAPP scheint weichmachend zu wirken. Bei 30 w-% Spuckstoff sind die Mischungen mit 0,1x MAPP und konstantem Gehalt MAPP identisch. Die Viskosität liegt hier, wie auch bei allen höheren Füllstoffgehalten unterhalb derer ohne MAPP. Ein Trend hinsichtlich des Einflusses des Anteils an MAPP ist nicht eindeutig zu erkennen. Für alle drei

Messreihen gilt, dass die Viskosität mit steigendem Füllstoffanteil zunimmt.

Die Ergebnisse der Fließweglängenmessungen im Spritzguss sind in Abbildung 7.37 dargestellt.

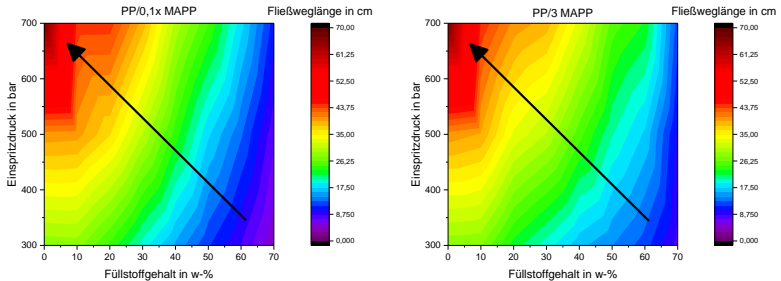


Abbildung 7.37: Fließweglänge der mit MAPP in Abhängigkeit vom Füllstoffgehalt und vom Einspritzdruck

Der grundsätzliche Trend ist bei beiden Messreihen identisch: Mit sinkendem Füllstoffgehalt und steigendem Einspritzdruck nimmt die Fließweglänge zu. Dieses Verhalten ist bereits von den Compounds aus PP und Spuckstoff ohne MAPP bekannt (vgl. Abbildung 6.21). Ein direkter Vergleich ist in der gewählten Farbdarstellung nur schlecht möglich. Daher wurden die Daten erneut zusammen mit den Ergebnissen der Compounds ohne Haftvermittler in Abbildung 7.38 auf der folgenden Seite aufgetragen.

Insgesamt liegen die gemessenen Fließweglängen aller drei Messreihen im selben Bereich. In den meisten Fällen sind die Fließweglängen der Compounds mit MAPP höher, als bei denen ohne MAPP. Dies bestätigt den Trend der Rheometer-Messungen der Compounds bei 30 w-% und 50 w-% Spuckstoffanteil. Bei den Fließspiralen sind auch bei 10 w-% die Fließweglängen mit MAPP größer, als ohne. Wie bereits bei der Betrachtung der Compounds aus PP und Spuckstoff in 6.1.3.2.4 ausführlich diskutiert wurde, ist die gemessene Viskosität der Probe mit 10 w-% aufgrund der Schergeschwindigkeitsüberhöhung ungewöhnlich gering, sodass ein

Vergleich der Viskosität bei diesem Füllstoffgehalt immer in Kontext mit den Fließspiralen zu bewerten ist.

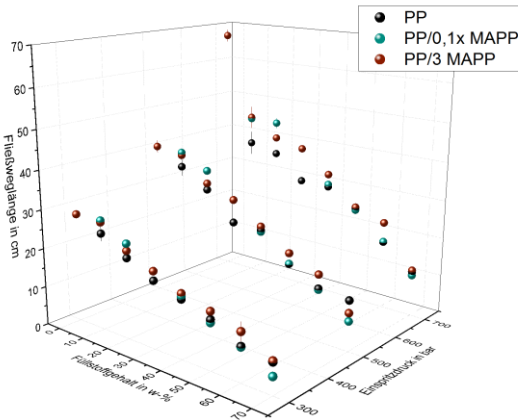


Abbildung 7.38: Fließweglänge der Compounds der Messreihen mit PP, PP/0,1x MAPP und PP/3 MAPP in Abhängigkeit vom Füllstoffgehalt und dem Einspritzdruck

Zusammenfassend ist festzustellen, dass MAPP die Fließfähigkeit der Compounds verbessert. Ein Unterschied zwischen den verschiedenen MAPP-Gehalten ist nicht festzustellen. Die gesunkene Viskosität lässt sich einerseits mit dem Vorhandensein von nicht reagiertem MAPP in der Matrix erklären, welches als Weichmacher wirkt. Außerdem verändert die Anbindung des MAPP an den Spuckstoff die Faseroberfläche, sodass in der Schmelze ein besseres Abgleiten ermöglicht wird.

7.2.4 Kostenabschätzung und Anwendungsbeurteilung

Die vorgestellten Ergebnisse zeigen, dass durch Zugabe von MAPP Verbesserungen der mechanischen Eigenschaften der Spuckstoff-Compounds erzielt werden können. Insbesondere der Elastizitätsmodul und die Zugfestigkeit profitieren von der bessern Faser-Matrix-Haftung. Außerdem wird die Viskosität geringfügig gesenkt,

sodass im Spritzguss eine bessere Werkzeugfüllung zu erwarten ist. Ob diese Vorteile die Mehrkosten des Haftvermittlers rechtfertigen, ist daher näher zu betrachten.

Die Marktpreise für MAPP sind stark von der Ppropfdichte und der Reinheit des Materials abhängig. Für Laborversuche geeignetes MAPP mit einer Ppropfdichte von ca. 10 w-% kostet beispielsweise beim Chemikalienhersteller SIGMA-ALDRICH 186 €/kg [135]. Das in dieser Arbeit verwendete SCONA® TPPP 8012 FA wird regulär für ca. 3,40 €/kg angeboten. Bei größeren Mengen ist eine Reduktion des Angebotspreises auf 3 €/kg möglich [136]. Mit den in Kapitel 6.1.4 vorgestellten Materialkosten von 960 €/t für PP und 350 €/t für den getrockneten und zerkleinerten Spuckstoff, ergeben sich die in Abbildung 7.39 dargestellten Preisverläufe in Abhängigkeit des Füllstoffgehaltes. Der Preis für das ungefüllte PP ist gestrichelt dargestellt. Es ist klar ersichtlich, dass der im Vergleich mit dem PP und dem Spuckstoff teure Haftvermittler die Gesamtkosten erhöht.

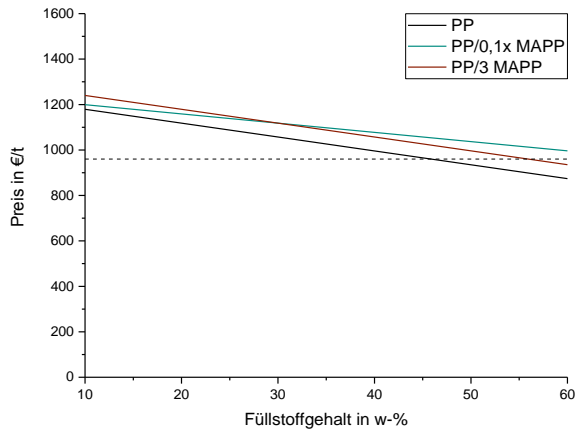


Abbildung 7.39: Preise der Compounds aus PP, MAPP und Spuckstoff in Abhängigkeit des Füllstoffgehaltes

Um die gestiegenen Kosten mit den verbesserten Eigenschaften zu korrelieren, bietet es sich an die Materialkennwerte durch die Kosten zu teilen, also einen kostenbezogenen Kennwert zu berechnen. Die

so erhaltenen Werte sind exemplarisch für 30 w-% in Abbildung 7.38 in einem Netzdiagramm dargestellt. Für 10 w-% und 50 w-% Spuckstoff sind die Netzdiagramme im Anhang (Abbildung 12.37 und Abbildung 12.38) zu finden. Die Netzdiagramme sind so zu verstehen, dass ein hoher kostenbezogener Kennwert bei allen Größen positiv zu werten ist. Demnach ist das Material mit der größten Fläche den anderen betrachteten Materialien insgesamt überlegen.

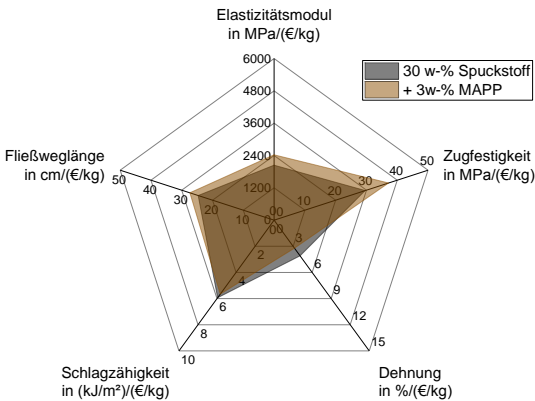


Abbildung 7.40: kostenbezogene Eigenschaften der Compounds aus PP, Spuckstoff und z.T. MAPP

Bei 10 w-% Spuckstoffanteil ist die Kombination aus PP und Spuckstoff ohne Haftvermittler noch am kosteneffizientesten. Bei 30 w-% Spuckstoff ist die Zugabe des Haftvermittlers vorteilhaft. Zwar sind die Schlagzähigkeit und die Dehnung etwas reduziert, Elastizitätsmodul und Zugfestigkeit sind jedoch erhöht. Auch die Fließfähigkeit, hier dargestellt durch die Fließweglänge, ist auf die Kosten bezogen besser.

Im Falle von 50 w-% Spuckstoff zeigt sich ebenfalls, dass das MAPP eine überproportionale Eigenschaftssteigerung hervorruft, die die gestiegenen Kosten rechtfertigt. Die Zugabe von mehr als 3 w-% Haftvermittler ist wirtschaftlich jedoch nicht ratsam.

Für eine mögliche Anwendung der Compounds lässt sich schlussfolgern, dass die Eigenschaften der Spuckstoff-Compounds im Bedarfsfall durch die Zugabe von MAPP mit relativ geringem finanziellem Aufwand verbessert werden können. Gerade bei hohen Füllstoffgehalten ist dies ein probates Mittel. Die Entscheidung ob der Einsatz eines Haftvermittlers notwendig ist oder nicht, ist jedoch von den spezifischen Anforderungen der einzelnen Anwendungen abhängig und kann daher an dieser Stelle nicht allgemeingültig getroffen werden. Entsprechend können für die Compounds mit MAPP dieselben Anwendungsempfehlungen ausgesprochen werden, wie bereits für die zuvor betrachteten Spuckstoff-Compounds. Gegebenenfalls lässt sich der Einsatzbereich um strukturell auf Zug belastete Teile erweitern, da insbesondere der Elastizitätsmodul und die Zugfestigkeit durch den Haftvermittler verbessert werden.

8 Vergleich der Spuckstoff-Compounds mit den Referenzmaterialien

Um das Potential der Spuckstoff-Compounds abschätzen zu können, werden ihre Eigenschaften in diesem Kapitel mit denen der in Kapitel 6.3 behandelten Referenzmaterialien verglichen. Dies geschieht im ersten Schritt für jeden Materialkennwert einzeln. Dadurch ist die Korrelation von Materialeigenschaften und -struktur möglich. Am Ende des Kapitels wird die Leistungsfähigkeit über alle Eigenschaften betrachtet und mit den Herstellungskosten und den potentiellen Anwendungsfällen korreliert.

8.1 Mechanische Eigenschaften

8.1.1.1 Zugeigenschaften

Die aus dem Zugversuch bestimmten Eigenschaften der Spuckstoff-Compounds und der Naturfaserreferenzen sind in Abbildung 8.1 bis Abbildung 8.6. gegeneinander aufgetragen. Bei den Spuckstoff-Compounds wurde sich zugunsten der Übersichtlichkeit auf die Compounds aus Neumaterial beschränkt. Unterschiede zwischen Neu- und Recyclingmaterial wurden in Kapitel 6.2 bereits diskutiert.

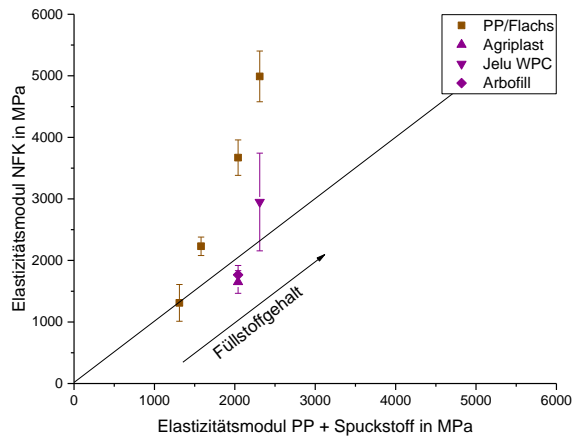


Abbildung 8.1: Elastizitätsmodul der Compounds mit PP-Matrix

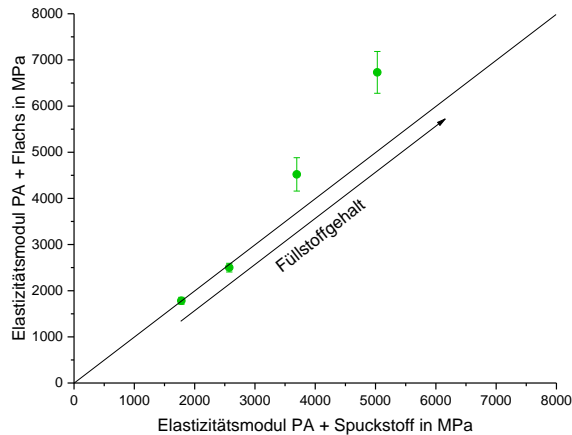


Abbildung 8.2: Elastizitätsmodul der Compounds mit PA-Matrix

In Abbildung 8.1 und Abbildung 8.2 ist zu erkennen, dass die Kombination aus Neumaterial und Flachsfasern meist höhere Elastizitätsmoduln erreicht, als die entsprechenden Spuckstoff-compounds. Insbesondere bei hohen Füllstoffgehalten zeigt sich die bessere Kraftaufnahme der längeren Flachsfasern. Im Vergleich mit den kommerziellen NFK sind die Compounds mit Spuckstoff

konkurrenzfähig. Bei 30 w-% Füllstoffanteil besitzen Arbofill, Agriplast und das Spuckstoff-Compound mit PP-Matrix nahezu dieselbe Steifigkeit

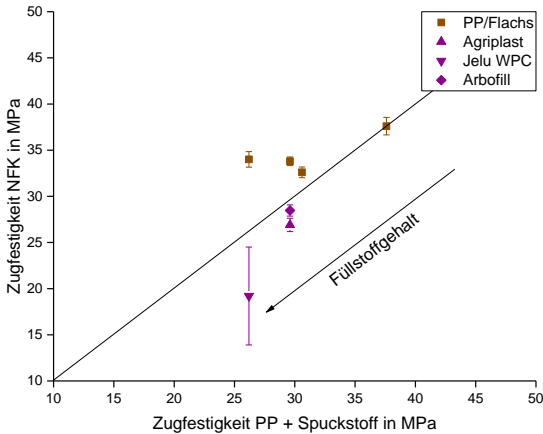


Abbildung 8.3: Zugfestigkeit der Compounds mit PP-Matrix

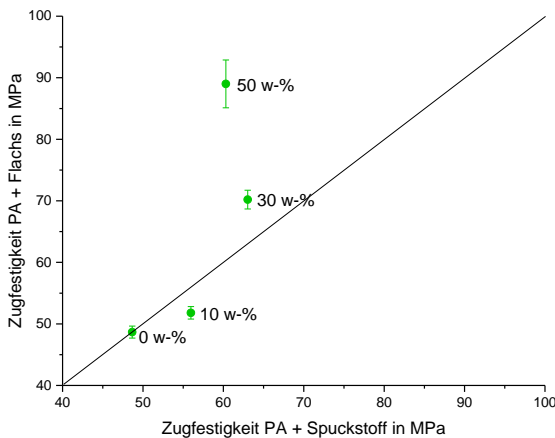


Abbildung 8.4: Zugfestigkeit der Compounds mit PA-Matrix

Die Zugfestigkeiten (Abbildung 8.3 und Abbildung 8.4) zeigen ein ähnliches Verhalten, wie die Elastizitätsmoduln. Die Werte der Flachs-Compounds sind höher, als die der Spuckstoff-Compounds.

Durch die im Vergleich mit den Papierfasern, längeren Flachsfasern wird die Zugfestigkeit erhöht. Die Zugfestigkeit der drei kommerziellen NFK ist jedoch geringer, als die der Spuckstoff-Compounds. Im Falle von PA als Matrixmaterial ist der Effekt der längeren Flachsfasern wesentlich deutlicher ausgeprägt, als beim PP. Hierin zeigt sich erneut die bessere Faser-Matrix-Haftung von PA und den Naturfasern.

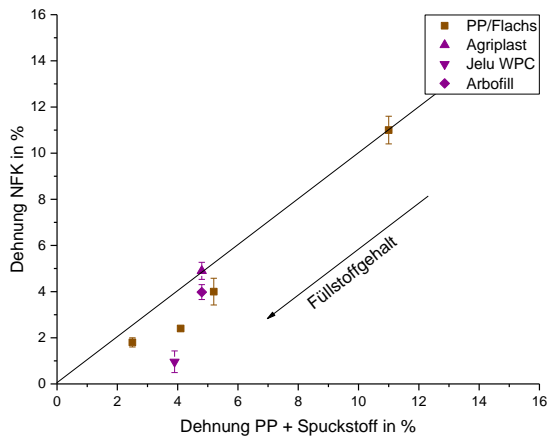


Abbildung 8.5: maximale Dehnung der Compounds mit PP-Matrix

Bei Betrachtung der maximalen Dehnung der PP-Compounds (Abbildung 8.5) wird deutlich, dass die bessere Versteifung und Verstärkung der Flachsfaser in einer reduzierten Dehnung resultiert. Die langen Flachsfasern sind nicht so dehnbar wie die Matrix und verringern damit die maximale Dehnung des Verbundes. Dieser Effekt tritt beim Spuckstoff und den anderen NFK auch auf, allerdings in geringerem Ausmaß.

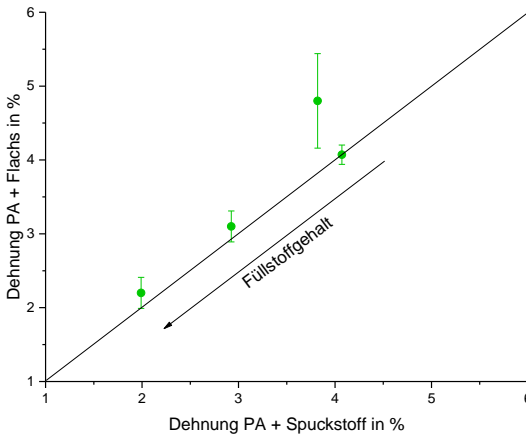


Abbildung 8.6: maximale Dehnung der Compounds mit PA-Matrix

Die PA-Compounds zeigen ein etwas anderes Verhalten (Abbildung 8.6). Hier sind die Dehnungen der Flachs- und der Spuckstoff-Compounds nahezu identisch. Durch die gute Faser-Matrix-Haftung der lignocellulosischen Fasern und des PA ist die Abnahme der Dehnung im Vergleich mit dem reinen Matrixmaterial nicht so groß.

Zusammenfassen lässt sich schlussfolgern, dass die Zugeigenschaften der selbst hergestellten Flachsfasern-Compounds aufgrund der größeren Faserlänge etwas besser sind, als die der Spuckstoff-Compounds. Die kommerzielle NFK besitzen größtenteils ähnliche oder sogar schlechtere Kennwerte, als die Compounds aus PP und Spuckstoff.

8.1.1.2 CHARPY-Schlagzähigkeit

Die CHARPY-Schlagzähigkeiten der Spuckstoff-Compounds und der Referenzmaterialien sind in Abbildung 8.7 und Abbildung 8.8 gegeneinander aufgetragen.

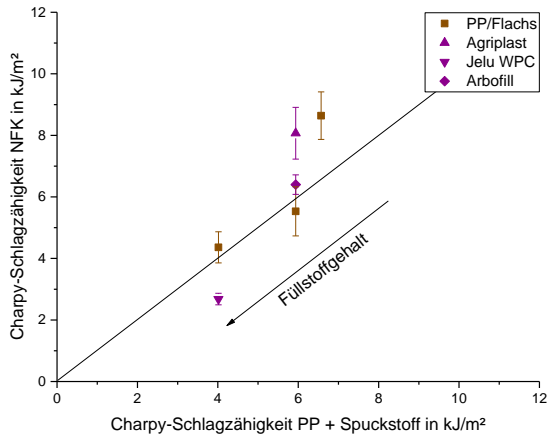


Abbildung 8.7: CHARPY-Schlagzähigkeit der Compounds mit PP-Matrix

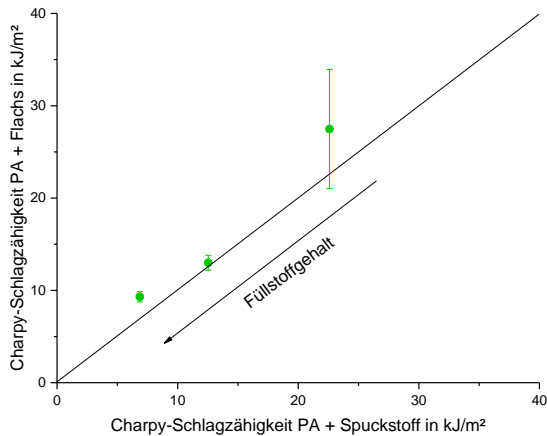


Abbildung 8.8: CHARPY-Schlagzähigkeit der Compounds mit PA-Matrix

Erneut sind die Mittelwerte der PP-Flachs-Compounds etwas höher, als die der Compounds mit Spuckstoff und PP. Aufgrund der Standardabweichung können die Werte jedoch in den meisten Fällen als vergleichbar angesehen werden. Das Arbofill besitzt ebenfalls

eine ähnliche Schlagzähigkeit. Eine etwas höhere Schlagzähigkeit weist das Agriplast auf, während das Jelu WPC weniger schlagzäh ist, als die selbst hergestellten Compounds.

Bei Polyamid als Matrixmaterial sind keine signifikanten Unterschiede zwischen Flachs- und Spuckstoff-Compound zu sehen.

Insgesamt kann somit festgestellt werden, dass die Spuckstoff-Compounds hinsichtlich der CHARPY-Schlagzähigkeit zu den selbsthergestellten und den kommerziellen NFK konkurrenzfähig sind. Die im Vergleich mit den Flachsfasern kürzeren Fasern des Spuckstoffs und die Verunreinigung wirken sich nicht nachteilig auf das Verhalten unter Schlagbeanspruchung aus.

8.2 Thermische Eigenschaften

8.2.1 Schmelz- und Kristallisationsverhalten

Wie bereits in Kapitel 6.1 und 6.3 vorgestellt wurde, verändert sich weder bei den Compounds mit Neumaterial, noch bei den Referenzmaterialien die Schmelztemperatur über den Füllstoffgehalt. Für die Compounds mit PP liegt die Schmelztemperatur im Rahmen der Messgenauigkeit bei konstant 165 °C, bei PA um ca. 220 °C.

Die Schmelzenthalpien sind in Abbildung 8.9 und Abbildung 8.10 dargestellt.

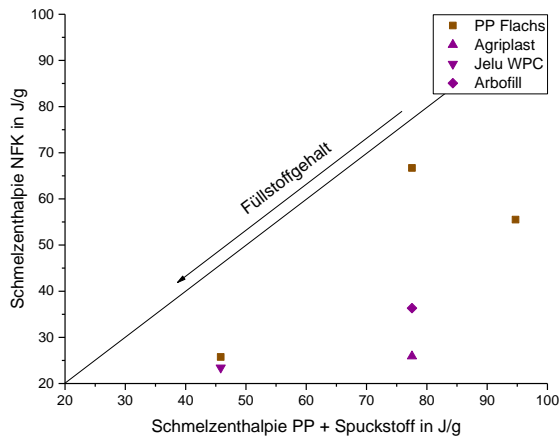


Abbildung 8.9: Schmelzenthalpie der Compounds mit PP-Matrix

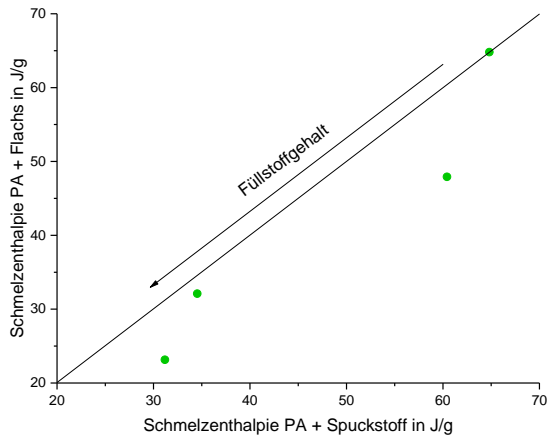


Abbildung 8.10: Schmelzenthalpie der Compounds mit PA-Matrix

Die Schmelzenthalpien und damit auch die Kristallinitäten der Compounds aus Spuckstoff und PP bzw. PA sind zum Teil deutlich höher, als die bei Flachs bzw. den kommerziellen NFK.

Unter Einbeziehung der Ergebnisse aus der Reinigung des Spuckstoffs mittels SOXHLET-Extraktion aus Kapitel 7.1 ist es denkbar, dass der Spuckstoff aufgrund der an der Faser Oberfläche vorhandenen

Kontaminationen einen besseren Kristallisationskeim für die Matrix darstellt, als die Flachsfaser.

8.2.2 Thermische Zersetzung

Die TGA-Kurven der Spuckstoff-Compounds und der Referenzmaterialien sind in Abbildung 8.11 und Abbildung 8.12 zusammengefasst.

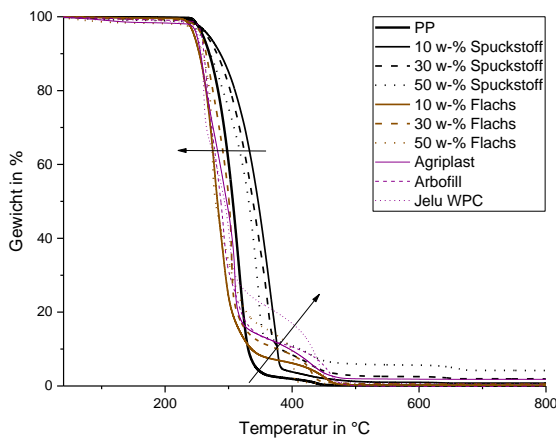


Abbildung 8.11: TGA-Kurven der Compounds mit PP-Matrix

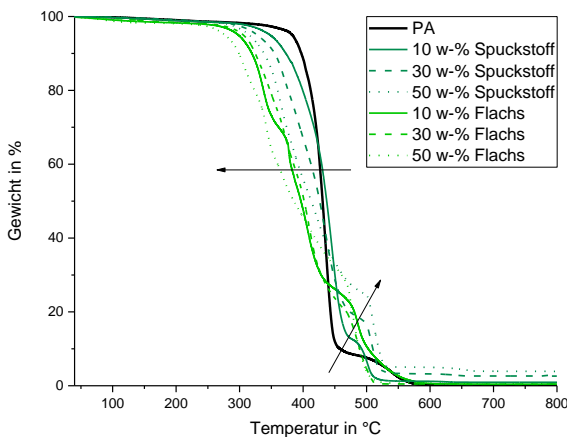


Abbildung 8.12: TGA-Kurven der Compounds mit PA-Matrix

In beiden Darstellungen ist zu sehen, dass alle betrachteten Compounds im regulären Verarbeitungsbereich bis 250 °C stabil sind.

Die Hauptzersetzungsstufe der Spuckstoff-Compounds liegt bei höheren Temperaturen, als bei den naturfaserverstärkten Thermoplasten. Somit sind die NFK thermisch weniger stabil, als die Spuckstoff-Compounds. Bei den Mischungen mit PP sorgt der Spuckstoff sogar für eine Erhöhung der Zersetzungstemperatur gegenüber dem ungefüllten PP.

Vom Einsatz in Bauteilen, die beispielsweise mittels Heißkanaltechnik im Spritzguss bei erhöhten Temperaturen hergestellt werden, wird bei den NFK abgeraten.

8.2.3 Wärmeleitfähigkeit

Die Messwerte der Wärmeleitfähigkeit sind für alle betrachteten Matrixsysteme in Abbildung 8.13 dargestellt.

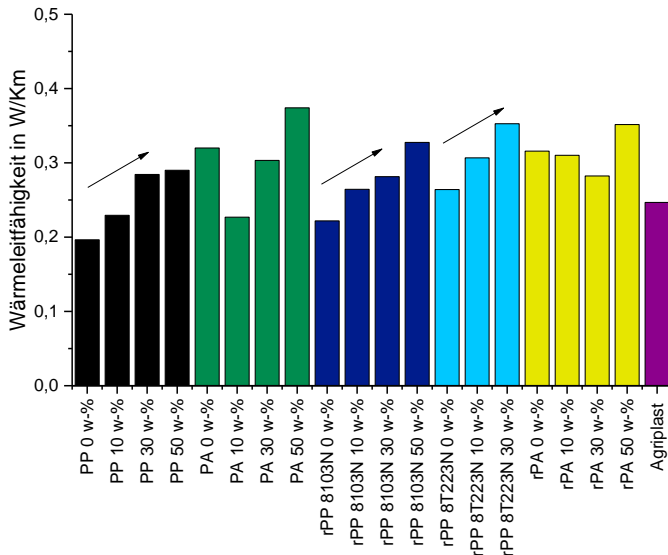


Abbildung 8.13: Wärmeleitfähigkeit aller gemessenen Compounds bei 50 °C

Insgesamt liegen alle Messwerte zwischen 0,2 W/K·m und 0,4 W/K·m. Bei den Compounds mit PP bzw. rPP ist eine Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit mit steigendem Füllstoffgehalt zu sehen. Bei den anderen Compounds kann ein eindeutiger Trend über den Füllstoffgehalt bzw. in Abhängigkeit des Matrixsystems nicht festgestellt werden.

Das Agriplast als ausgewähltes repräsentatives NFK hat eine eher im unteren Bereich der Messwerte liegende Wärmeleitfähigkeit. Somit isoliert es etwas besser als die Spuckstoff-Compounds mit gleichem Füllstoffgehalt (30 w-%).

8.2.4 Fließverhalten

Die Viskositäten der Naturfaser-Referenzen mit PP- und PA-Matrix - exemplarisch bei einer Winkelgeschwindigkeit von 100 rad/s bestimmt - sind in Abbildung 8.14 und Abbildung 8.15 gegen die entsprechenden Werte der Spuckstoff-Compounds aufgetragen.

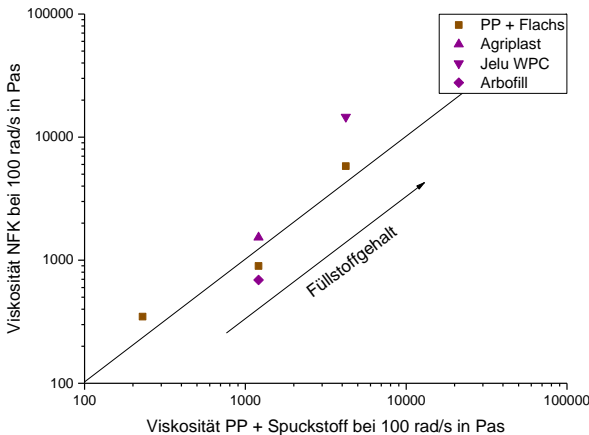


Abbildung 8.14: Viskositäten der Compounds mit PP-Matrix

Bei den PP-Compounds ist zu sehen, dass die Spuckstoff-Compounds und die Flachs-Compounds vergleichbare Viskositäten besitzen. Das Arbofill ist etwas niedrigviskoser, als die anderen

Compounds mit 30 w-% Füllstoff, während das Jelu WPC aufgrund der Holz-Füllung insgesamt die höchste Viskosität besitzt.

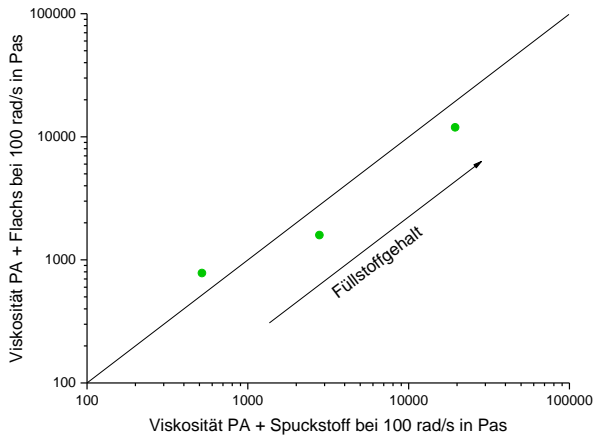


Abbildung 8.15: Viskositäten der Compounds mit PA-Matrix

Bei den PA-Compounds ist die Viskosität des NFK bei 10 w-% höher und bei 30 w-% und 50 w-% niedriger, als die der mit Spuckstoff gefüllten Mischungen. Die Werte liegen jedoch nah beieinander, sodass von einem ähnlichen Fließverhalten gesprochen werden kann und somit auch dieselben Verarbeitungsverfahren und Werkzeuge nutzbar sind.

Die gemessenen Fließweglängen (Abbildung 8.16 und Abbildung 8.17) zeigen, dass zwischen PP mit Spuckstoff und PP mit Flachs im Spritzguss nur geringe Unterschiede in der Fließfähigkeit bestehen. Dies bestätigt die Schlussfolgerung aus den Rheometermessungen. Bei den kommerziellen NFK fließt das Arbofill geringfügig weiter, als die selbst hergestellten Compounds, während das Agriplast etwas weniger fließfähig ist. Das Jelu WPC weist auch hier die mit Abstand geringsten Fließwege und damit die höchste Viskosität auf.

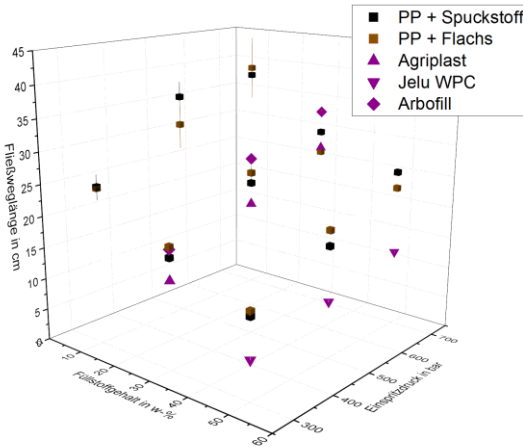


Abbildung 8.16: Fließweglängen der Compounds mit PP-Matrix in Abhängigkeit von Füllstoffgehalt und Einspritzdruck

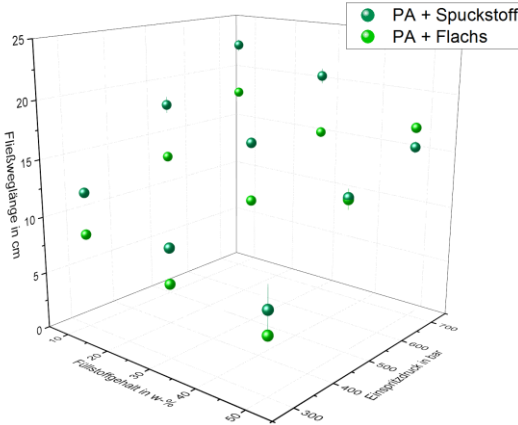


Abbildung 8.17: Fließweglängen der Compounds mit PA-Matrix in Abhängigkeit von Füllstoffgehalt und Einspritzdruck

Im Falle der PA-Matrix liegen fast alle Messwerte der Compounds mit Spuckstoff oberhalb derer mit Flachs. Dies widerspricht den Ergebnissen der Rheometermessungen, ist jedoch bei Betrachtung der Struktur der Compounds logisch. Die kürzeren Spuckstofffasern

hindern die Matrix weniger am Fließen, als die längeren Flachsfasern. Somit ist die Viskosität geringer und es können höhere Fließweglängen im Spritzgusswerkzeug erreicht werden.

8.3 Sonstige Eigenschaften

8.3.1 Wasseraufnahme

Die Wasseraufnahme der Proben mit PP- und PA-Matrix ist in Abbildung 8.18 und Abbildung 8.19 dargestellt.

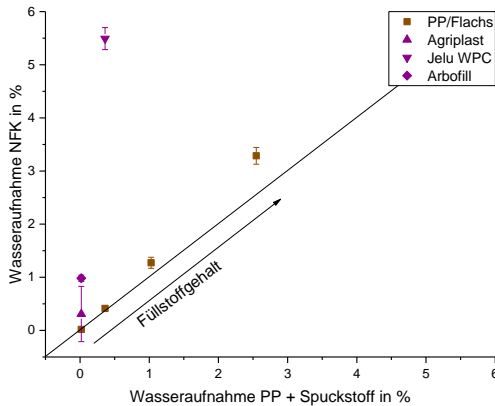


Abbildung 8.18: Wasseraufnahme der Compounds mit PP-Matrix

Bei den Compounds mit PP steigt die Wasseraufnahme mit dem Füllstoffgehalt an, da die hydrophilen Fasern mehr Wasser aufnehmen können, als die hydrophobe PP-Matrix. Die Flachsfasern zeigen dabei eine geringfügig stärkere Wasseraufnahme, als der Spuckstoff. Bei den kommerziellen NFK nimmt das Agriplast weniger Wasser auf, als die anderen Compounds mit 30 w-% Füllstoffanteil. Das Jelu WPC besitzt mit 5,5 % relativer Massezunahme die mit Abstand größte Wasseraufnahmefähigkeit. Durch den hohen Füllstoffgehalt ist es wahrscheinlich, dass einzelne Holzfasern an der Probenoberfläche liegen und nicht vollständig von PP umhüllt sind. Diese Fasern vereinfachen das Eintreten des Wassers in die Probe und führen daher zu der hohen Wasseraufnahme.

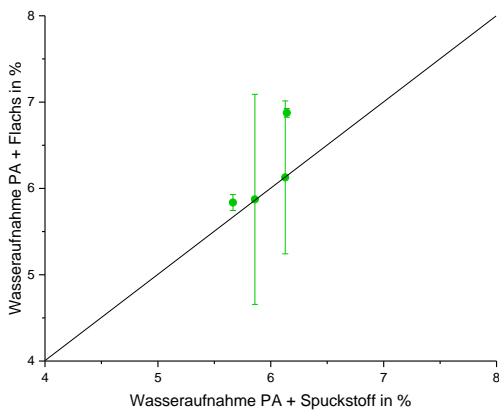


Abbildung 8.19: Wasseraufnahme der Compounds mit PA-Matrix

Die Wasseraufnahme der Compounds mit PA-Matrix ist nahezu konstant und unabhängig von der Faser oder dem Füllstoffgehalt. Die Wasseraufnahme ist eindeutig von der Matrix bestimmt.

8.3.2 Schimmelpilzresistenz

Die Ergebnisse der Schimmelpilzresistenz der Compounds mit 30 w-% Füllstoffanteil sind in Abbildung 8.20 dargestellt.

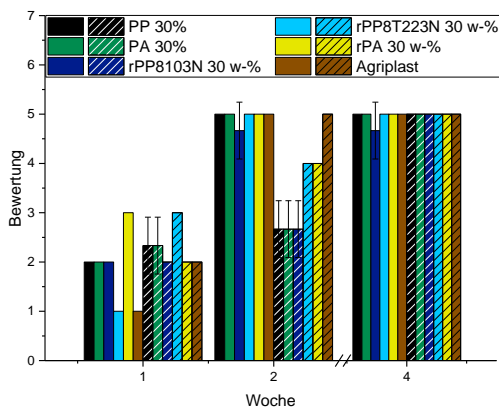


Abbildung 8.20: Schimmelbewuchses bei verschiedener Materialien mit 30 w-% Füllstoffanteil (Verfahren A: unschraffiert, Verfahren B: schraffiert)

Innerhalb der ersten zwei Wochen gibt es noch gewisse Unterschiede zwischen den Matrixsystemen bzw. zwischen Spuckstoff- und Naturfaser-Compounds. Nach vier Wochen im Brutschrank sind jedoch alle Proben in beiden Verfahren so stark vom Schimmel bewachsen, dass die Bewertung 5 gewählt werden musste. Ein beispielhaftes Foto des nach vier Wochen erhaltenen Bewuchses ist in Abbildung 8.21 zu sehen. Bei dem gewählten Füllstoffgehalt ist sowohl beim kommerziellen NFK, als auch bei den Spuckstoff-Compounds ein Schimmelwachstum unter geeigneten, warmen und feuchten Bedingungen möglich. Ein Verschimmeln des Materials ohne die äußere Zuführung von Schimmelsporen wird, wie bereits in Kapitel 6 diskutiert, aufgrund der hohen Verarbeitungstemperaturen der Compounds für unrealistisch erachtet.



Abbildung 8.21: Probekörper zur Untersuchung der Schimmelpilzresistenz des Agriplast nach vier Wochen Lagerung im Brutschrank (Verfahren A) [[89]]

8.4 Kosten und Anwendungen

Die Kosten zur Herstellung der einzelnen Materialien wurden bereits in den Kapiteln 6.1.4, 6.2.4 und 6.3.4 genauer betrachtet. Unterschiede ergeben sich hierbei vorwiegend aus den Kosten für die Ausgangsmaterialien. Für die Compoundierung und die nachfolgende Verarbeitung können dieselben Verfahren genutzt werden, sodass hier keine Kostenunterschiede resultieren. Wie in Kapitel 6.3.4 festgestellt, sind die NFK teurer, als vergleichbare Spuckstoff-Compounds, da der Preis für Naturfasern mit beispielsweise 500 €/t für Flachsfasern höher ist, als für den Spuckstoff mit 350 €/t. Kostenunterschiede innerhalb der Spuckstoff-Compounds ergeben sich durch die unterschiedlichen Marktpreise der verschiedenen Matrixsysteme.

Um nicht nur die Kosten und die Eigenschaften der Compounds getrennt voneinander zu betrachten, bietet es sich an, wie bereits in Kapitel 7.2.4 für die Compounds mit und ohne Haftvermittler gezeigt, die Eigenschaften auf die Kosten zu beziehen. Diese kostenbezogenen Eigenschaften lassen sich dann dargestellt in Netzdiagrammen für verschiedene Materialkombinationen vergleichen. Die Achsenabschnitte sind dabei in allen Diagrammen identisch. Für eine bessere Übersichtlichkeit gelten außerdem folgende Einschränkungen:

- Die thermische Zersetzung und das Schmelzverhalten werden nicht einbezogen. Die Zersetzung findet bei allen Materialien erst oberhalb der Verarbeitungstemperatur statt, sodass sich hier keine signifikanten Unterschiede ergeben. Die Schmelztemperatur ist unabhängig von Art und Anteil des Füllstoffs und für das jeweils betrachtete Matrixsystem konstant. Der Kristallisationsgrad wirkt sich unter anderem auf die Zug- und Schlageigenschaften aus und wird daher nicht gesondert betrachtet.
- Die Wärmeleitfähigkeit ist bei allen Compounds nahezu gleich und wird daher nicht einzeln dargestellt.

- Die Schimmelpilzresistenz wird ebenfalls außen vor gelassen. Alle untersuchten Materialien, mit Ausnahme des ungefüllten PP, zeigen nach vier Wochen im Brutschrank ein eindeutiges Schimmelwachstum.
- Die Viskosität wird über die Fließweglänge bei 500 bar Einspritzdruck dargestellt, der einer mittleren Einstellung entspricht.
- Damit weiterhin gilt, dass eine große Fläche im Netzdiagramm einem guten kostenbezogenen Eigenschaftsprofil entspricht, wird von der Wasseraufnahme der Kehrwert genommen und dieser als Wasseraufnahme-Resistenz benannt. Hier wird als einzige Ausnahme die Skalierung zwischen den Diagrammen variiert, da insbesondere das ungefüllte PP und die ungefüllten rPPs eine sehr große Wasseraufnahme-Resistenz besitzen. Der daraus abgeleitete Maximalwert der linearen Skala würde dazu führen, dass alle anderen Werte kaum erkennbar wären.

In Abbildung 8.22 bis Abbildung 8.24 sind exemplarisch die kostenbezogenen Eigenschaften der Compounds aus PP bzw. rPP mit Spuckstoff oder Flachs als Füllstoff für die Füllstoffgehalte von 10 w-%, 30 w-% und 50 w-% dargestellt.

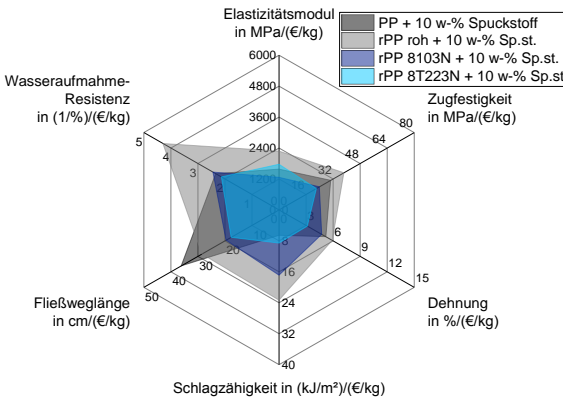
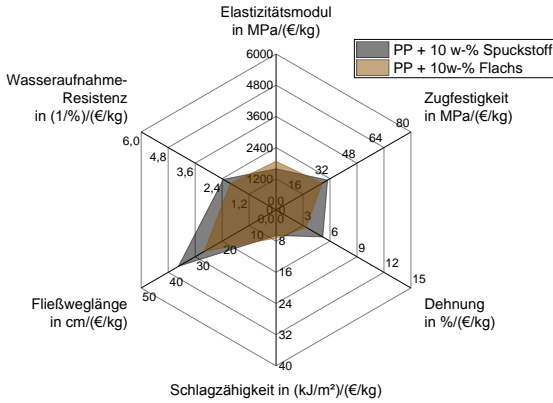


Abbildung 8.22: Netzdiagramme der kostenbezogenen Eigenschaften der PP- bzw. rPP-Compounds für 10 w-% Füllstoffanteil

Bei 10 w-% Füllstoffanteil sind die PP-Spuckstoff-Compounds dem Flachs-Compound überlegen. Lediglich der kostenbezogene Elastizitätsmodul des Flachs-Compounds ist etwas höher, als der der Mischung aus PP und Spuckstoff. Der Einsatz der Recyclingmaterialien, insbesondere des günstigen, vorher nicht compoundierten rPP roh, steigert die Werte aufgrund der geringen Materialpreise der Matrixsysteme nochmals deutlich.

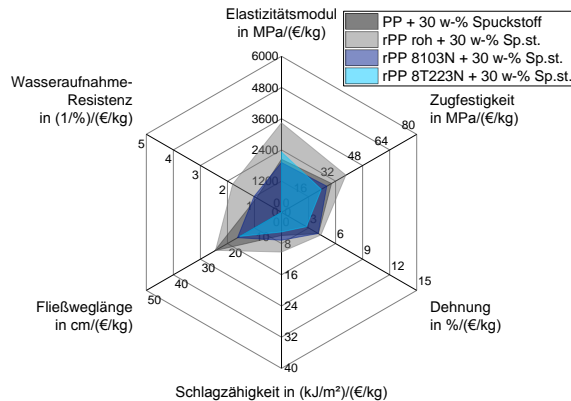
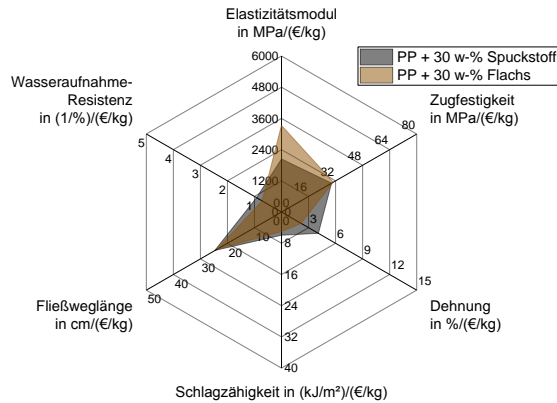


Abbildung 8.23: Netzdiagramme der kostenbezogenen Eigenschaften der PP- bzw. rPP-Compounds für 30 w-% Füllstoffanteil

Eine Erhöhung auf 30 w-% Füllstoffanteil führt dazu, dass sich die Unterschiede zwischen dem Flachs-Compound und den Spuckstoff-Compounds annähern. Im Falle des Neumaterials als Matrix ist das kostenbezogene Eigenschaftsprofil mit Ausnahme der Dehnung und des Elastizitätsmoduls nahezu identisch. Bei den Recyclingmaterialien kann mit dem rPP roh noch eine leichte Steigerung der

auf die Kosten umgerechneten mechanischen Eigenschaften gegenüber dem Flachs-Compound erreicht werden.

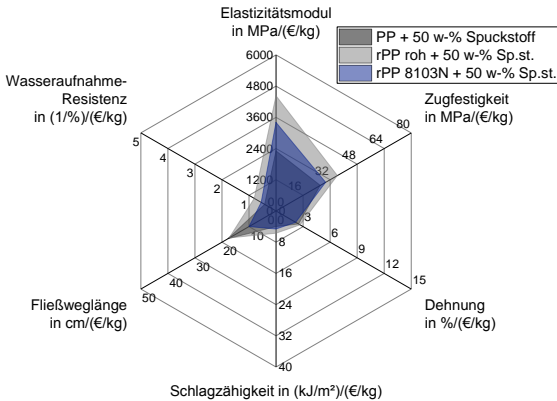
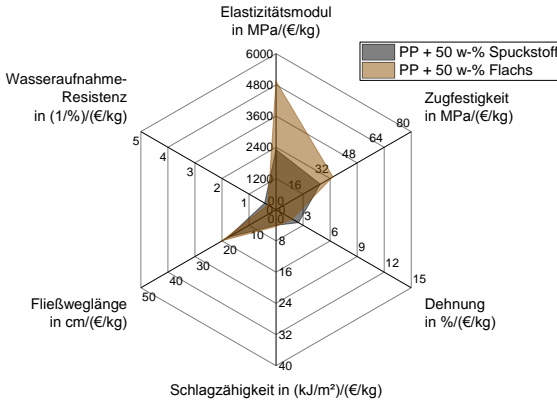


Abbildung 8.24: Netzdiagramme der kostenbezogenen Eigenschaften der PP- bzw. rPP-Compounds für 50 w-% Füllstoffanteil

Für hohe Füllstoffanteile (z.B. 50 w-%) ist die Flachsfaser trotz höherer Kosten besser geeignet. Die Eigenschaften des Spuckstoff-Compounds mit neuem PP sind auch kostenbezogen deutlich schlechter. Durch den Einsatz der Recyclingmaterialien können in

diesem Fall die Kosten nicht so weit gesenkt werden, dass bei gleichen Kosten bessere Eigenschaften erreicht werden.

Im Vergleich mit den drei kommerziellen NFK, die in dieser Arbeit verwendet wurden, stellen die Spuckstoff-Compounds eine gute Alternative dar (siehe Abbildung 8.25).

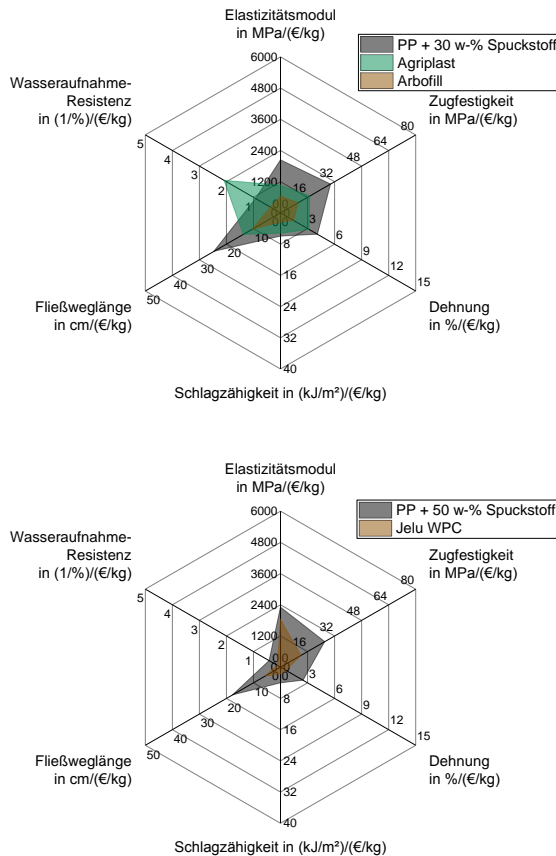


Abbildung 8.25: Netzdiagramme der kostenbezogenen Eigenschaften der kommerziellen Referenzmaterialien in Vergleich mit Spuckstoff-PP-Compounds mit identischem Füllstoffanteil

Die kostenbezogenen Eigenschaften des Agriplast und des Arbofill liegen beide unterhalb derer der Spuckstoff-Compounds. Das Jelu WPC zeigt eine erhöhte Wasseraufnahme, die für die meisten bisher diskutierten Anwendungen jedoch nachteilig ist.

Die kostenbezogenen Eigenschaften der Compounds mit PA bzw. rPA sind in Abbildung 8.26 bis Abbildung 8.28 aufgetragen.

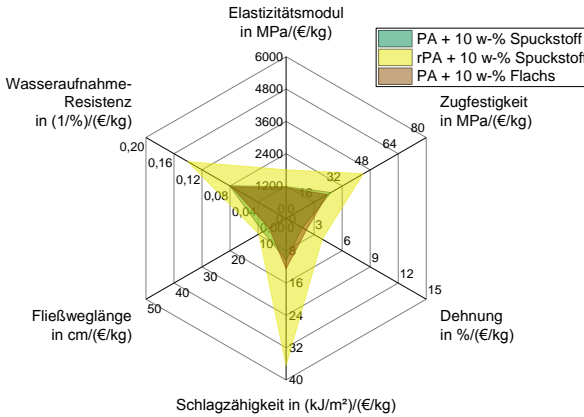


Abbildung 8.26: Netzdiagramm der kostenbezogenen Eigenschaften der PA- bzw. rPA-Compounds für 10 w-% Füllstoffanteil

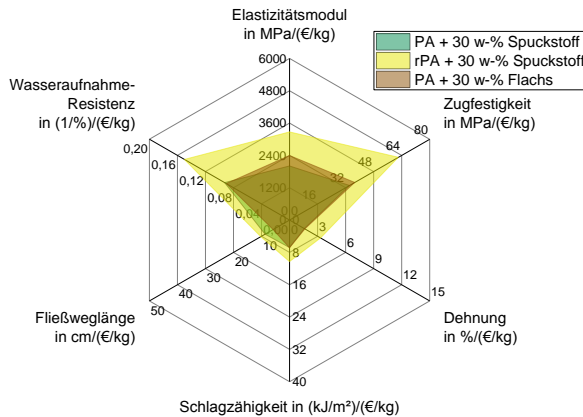


Abbildung 8.27: Netzdiagramm der kostenbezogenen Eigenschaften der PA- bzw. rPA-Compounds für 30 w % Füllstoffanteil

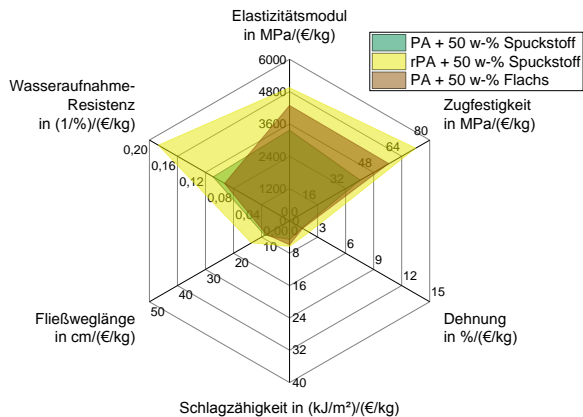


Abbildung 8.28: Netzdiagramm der kostenbezogenen Eigenschaften der PA- bzw. rPA-Compounds für 50 w % Füllstoffanteil

Für alle drei Füllstoffgehalte fällt auf, dass die Compounds mit rPA die größte Fläche ausfüllen. Dies liegt hauptsächlich daran, dass das Recyclingmaterial mit 1000 €/t nur knapp die Hälfte des

Neumaterials kostet. Wie in Kapitel 6.2.3 bereits beschrieben weichen die Eigenschaften von Neu- und Recyclingmaterial sonst kaum voneinander ab.

Beim Vergleich der beiden Compounds mit Neumaterial sind bei 10 w-% kaum Unterschiede erkennbar. Bei 30 w-% und vor allem bei 50 w-% wird deutlich, dass die längeren Flachsfasern zu besseren Zugeigenschaften führen. Die Wasseraufnahme-Resistenz der Flachs-Compounds ist bei 50 w-% dafür geringer.

Für den Vergleich zwischen Spuckstoff- und Flachs-Compounds lässt sich festhalten, dass bei niedrigen Füllstoffgehalten bis ca. 30 w-% mit demselben finanziellen Einsatz ungefähr dieselben Eigenschaften erzielt werden können. Die Entscheidung welches Material für ein bestimmtes Bauteil am besten geeignet ist, muss letztendlich anhand des entsprechenden Lastenheftes getroffen werden. Da an dieser Stelle kein vollständig ausgelegtes Bauteil mit zugehörigem Anforderungsprofil vorhanden ist, können keine detaillierteren Aussagen getroffen werden. Auf Basis des durchgeführten Vergleiches konnte jedoch gezeigt werden, dass die Abweichungen der absoluten und der kostenbezogenen Eigenschaften der Spuckstoff- und der Flachs-Compounds bzw. der kommerziellen NFK gering sind. Eine Substitution von NFK durch Spuckstoff-Compounds ist in den bereits in den Kapiteln 6.1.4 und 6.3.4 diskutierten Anwendungen somit möglich.

Neben der Substitution von NFK ist durch den Einsatz des Spuckstoffes auch eine Substitution von erdölbasierten Kunststoffen denkbar. Wie in Abbildung 8.29 zu sehen ist resultiert daraus jedoch ein deutlich verändertes Eigenschaftsprofil.

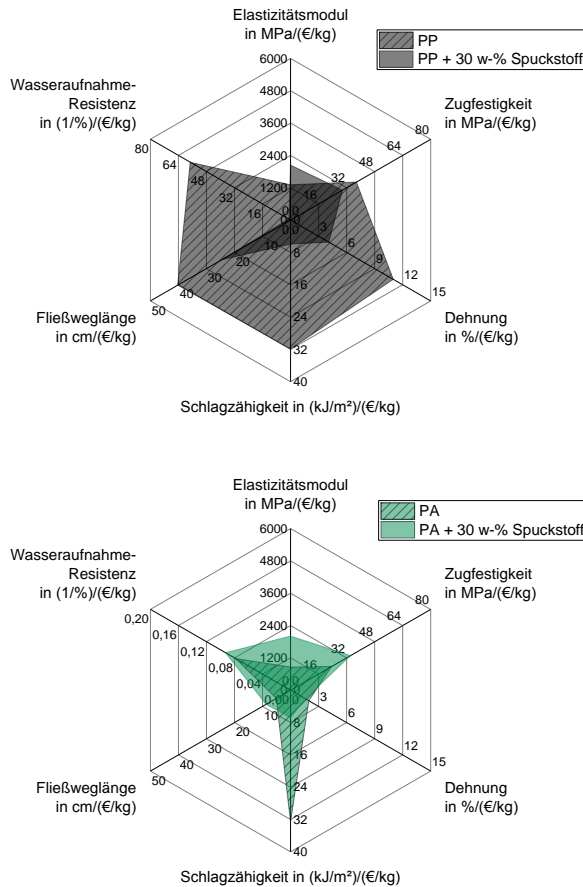


Abbildung 8.29: Netzdiagramme der kostenbezogenen Eigenschaften der Spuckstoff- Compounds mit 30 w-% Füllstoffgehalt und dem ungefüllten Neumaterial

Sowohl bei PP, als auch bei PA als Matrixsystem wird der Elastizitätsmodul deutlich erhöht. Aus dieser Versteifung resultiert eine drastische Abnahme der maximalen Dehnung und der Schlagfestigkeit. Beim PP steigt außerdem die Wasseraufnahme, während die Fließfähigkeit sinkt. Aus diesen Ergebnissen kann

geschlussfolgert werden, dass der Einsatz der Spuckstoff-Compounds in Anwendungen, in denen aktuell ungefülltes PP oder PA eingesetzt wird, eher kritisch zu sehen ist. Es ist ratsamer in diesen Anwendungen auf recyceltes ungefülltes Material zurückzugreifen, das, wie in dieser Arbeit ebenfalls gezeigt wurde, annähernd gleich gute oder zum Teil bessere Eigenschaften besitzt, als das Neumaterial.

Ein grafischer Vergleich aller Systeme miteinander ist in Abbildung 8.30 dargestellt. Dazu wurden die Achsenabschnitte aus den zuvor gezeigten kostenspezifischen Eigenschaften in eine Skala von 0 bis 5 umgewandelt und die zugehörigen Zahlenwerte normiert. Die so erhaltenen Kennzahlen für Elastizitätsmodul, Zugfestigkeit, Dehnung, Schlagzähigkeit und Fließweglänge wurden für jedes Compound aufsummiert und gegen den Füllstoffgehalt aufgetragen. Bei dieser Methodik sind diese Eigenschaften somit als gleichwertig anzusehen. Aufgrund der großen Unterschiede zwischen PA und PP ist die Wasseraufnahmesistenz nicht einbezogen.

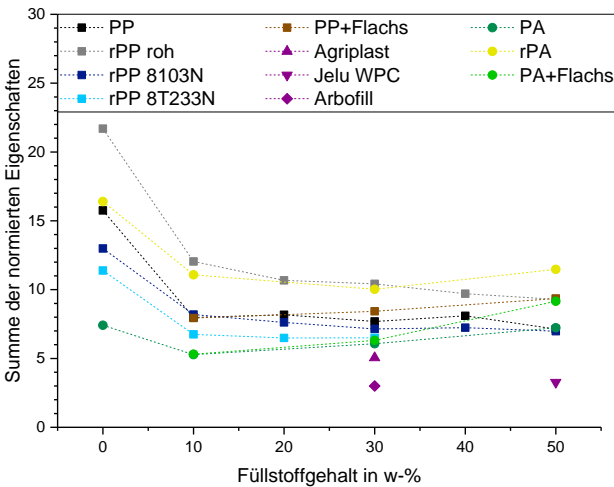


Abbildung 8.30: Vergleich aller Compounds

Diese Darstellung bestätigt die vorherige Schlussfolgerung, dass die ungefüllten Materialien in Summe ein besseres kostenbezogenes Eigenschaftsprofil besitzen, da die Schlagzähigkeit, die Fließfähigkeit und die Dehnung deutlich höher sind, als bei gefüllten Systemen. Der Vergleich der gefüllten Systeme untereinander zeigt, dass die Gesamtperformance je nach Matrixsystem mit steigendem Füllstoffanteil besser oder schlechter wird. Diese Trends lassen sich abstrahiert in Abbildung 8.31 zusammenfassen:

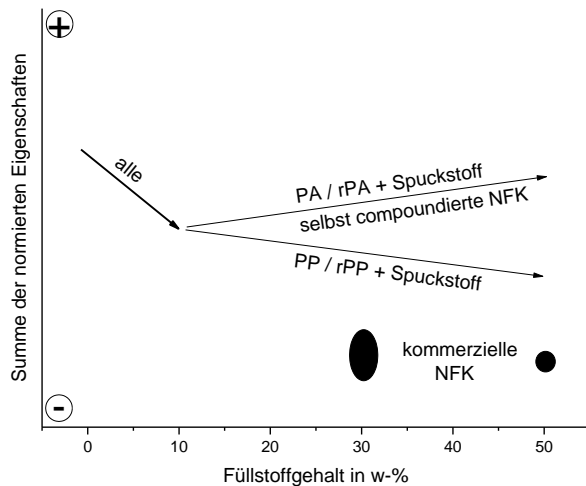


Abbildung 8.31: abstrahierte Darstellung der Veränderungen des Eigenschaftsprofils über den Füllstoffgehalt

Bei den Systemen aus neuem oder recycelten PP und Spuckstoff, sinkt die Summe der normierten Eigenschaften mit steigendem Spuckstoffanteil leicht ab oder bleibt konstant. Dies ergibt sich hauptsächlich aus dem sinkenden Preis bei weitgehend unveränderten Eigenschaften.

Die Compounds aus PA bzw. rPA und Spuckstoff zeigen mit zunehmendem Füllstoffgehalt bessere spezifische Eigenschaften. Begründet werden kann dies mit der im Vergleich mit PP stärkeren Faser-Matrix-Haftung und der erhöhten Kostenersparnis bei der Substitution von Polyamid mit Spuckstoff.

Im Vergleich mit den naturfaserverstärkten Kunststoffen zeigt sich, dass die drei industriellen Compounds mit Abstand das schlechteste Preis/Leistungs-Verhältnis besitzen. Die selbst compoundierten NFK mit Flachs besitzen ein ähnlich gut oder besser zu bewertendes Profil, wie die zugehörigen Spuckstoff-Compounds. Dies resultiert aus geringfügig besseren Eigenschaften bei höheren Produktionskosten.

Das insgesamt beste kostenbezogene Eigenschaftsprofil über alle Füllstoffgehalte besitzen die Compounds mit rPP roh und rPA, da die Materialkosten für die Kunststoffgranulate deutlich geringer sind, als bei den vergleichbaren Neumaterialien.

9 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit hat sich ausführlich und ganzheitlich mit neuartigen Compounds aus thermoplastischen Kunststoffen und einem Spuckstoff aus dem Altpapierrecycling befasst. Aus den erfassten Daten konnten folgende Kernaussagen abgeleitet werden:

- Der betrachtete Spuckstoff besteht zu ca. 97 w-% aus lignocellulosischen Fasern. Weitere Bestandteile sind EPS und Holzsplitter.
- Die Zusammensetzung des Spuckstoffes schwankt nur geringfügig, sodass von einem Ausgangsmaterialstrom mit konstanten Eigenschaften ausgegangen werden kann.
- Eine Verarbeitung des Spuckstoffs zusammen mit thermoplastischen Kunststoffen zu Compounds ist mit den nach Stand der Technik bekannten Verfahren problemlos möglich.
- Weitere Aufbereitungsschritte zur Trennung von Fasern und Fremdstoffen (z.B. Holz und EPS) können die Fremdstoffe nicht vollständig entfernen.
- Eine vollständige Abtrennung der Fremdstoffe ist nicht notwendig, da darauf keine signifikante Verbesserung der Eigenschaften resultiert.
- Durch Kombination des Spuckstoffs mit Recyclingkunststoffen können Compounds aus 100 % Recyclingmaterial erhalten werden, die nahezu dieselben Eigenschaften besitzen wie Compounds mit Neumaterial als Matrix.
- Bei Bedarf können die mechanischen Eigenschaften der Spuckstoff-Compounds durch den Einsatz des Haftvermittlers MAPP gesteigert werden. Die Eigenschaftsverbesserung ist dabei überproportional zu den Mehrkosten und somit wirtschaftlich sinnvoll.
- Im Vergleich mit NFK sind die Spuckstoff-Compounds wirtschaftlich und hinsichtlich ihres Eigenschaftsprofils konkurrenzfähig. Für beide Materialklassen existieren

identische Anwendungsfälle, z.B. als Fassadenverkleidung, als Aufbewahrungsbox oder in der Automobilindustrie.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Spuckstoff-Compounds ein deutliches Potential zur Hochskalierung in einen industriellen Prozess aufweisen. Damit wäre einerseits eine werk- und wertstoffliche Nutzung für den Spuckstoff gegeben und andererseits eine Substitution für andere, teurere Faserstoffe gefunden.

10 Ausblick

Mit den Ergebnissen dieser Arbeit ist ein erster Schritt hin zur werkstofflichen Nutzung von Spuckstoffen aus dem Altpapier-recycling gegangen worden. Für eine Hochskalierung in einen industriellen Prozess ist es notwendig, dass die beteiligten Akteure (Papierfabriken, Compoundierer, Kunststoffverarbeiter) in den Dialog treten und eine für alle Seiten rentable Verarbeitungsrouten erarbeiten. Entsprechende Vorschläge wurden in dieser Arbeit bei der Betrachtung der Kosten bereits diskutiert.

Parallel dazu müssen Einsatzfälle identifiziert werden, bei denen auch ein realer Absatzmarkt bzw. Kundeninteresse vorhanden ist. Bei Gesprächen mit Verarbeitern, Kollegen und Fachpublikum auf Tagungen wurde dies als eines der Hauptrisiken angesehen. Sowohl die Optik, als auch der Geruch der Spuckstoff-Compounds entsprechen nicht den von ungefüllten oder mineralisch gefüllten Kunststoffen bekannten Standards.

Diese beiden Eigenschaften wurden je nach Gesprächspartner als Vor- oder Nachteil angesehen. Potentiell nachteilig wird eine mangelnde Akzeptanz beim Endkunden gesehen, welche für eine erfolgreiche Positionierung am Markt hinderlich sein könnte. Fürsprecher sehen vor allem in der inhomogenen Optik eine Vermarktungschance, da bei vielen Konsumenten der Wunsch nach nachhaltigen, aus Recyclingmaterial bestehenden Produkten groß ist. Außerdem ergeben sich daraus neue Designmöglichkeiten. Der Geruch verflüchtigt sich nach einigen Wochen und ist nicht unangenehmer als der mancher NFK. In wie weit eine Markteinführung ökonomisch ratsam erscheint, ist keine werkstoffliche, sondern vielmehr eine strategische Frage mit Blick auf Produkt und angestrebte Zielgruppe.

Für spezielle Anwendungen, wie beispielsweise in Kinderspielzeug oder bei Lebensmittelkontakt wären vor der Einführung weitere

Untersuchungen notwendig. Außerdem müsste für den Spuckstoff als Werkstoff ein Datenblatt erstellt werden. Insbesondere für die Verarbeiter des Spuckstoffs wäre eine ausführlichere Gefahrenbeurteilung (z.B. nach Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 (REACH)) notwendig, die sowohl Gefährdungen während der Verarbeitung als auch für den Endkonsumenten betrachtet.

11 Verzeichnisse

11.1 Literaturverzeichnis

- [1] Population Division (UN DESA), *Entwicklung der Weltbevölkerungszahl von Christi Geburt bis zum Jahr 2017 (in Milliarden)*,
<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1694/umfrage/entwicklung-der-weltbevoelkerungszahl/>.
- [2] Population Division (UN DESA), *Prognose zur Entwicklung der Weltbevölkerung von 2010 bis 2100 (in Milliarden)*,
<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1717/umfrage/prognose-zur-entwicklung-der-weltbevoelkerung/>.
- [3] Statistisches Bundesamt (Destatis), *Abfallentsorgung - Fachserie 19 Reihe 1 - 2016* **2018**, 1.
- [4] K. Ragaert et al., *Design From Recycling Manual* **2018**.
- [5] Verband Deutscher Papierfabriken e. V., *Papier recyceln*, Bonn,
<https://www.vdp-online.de/fileadmin/Datensammlungen/Publikationen/Papierrecyceln.pdf> (27.02.2018).
- [6] H. Niethammer, *Deutsches Museum, Abhandlungen und Berichte, 22. Jahrgang (2)*.
- [7] *Papier: Produkt aus Lumpen, Holz und Wasser*, Kulturgeschichte der Naturwissenschaften und Technik (Eds: Deutsches Museum), Rowohlt Taschenbuch Verlag GmbH, Reineck bei Hamburg **1986**.
- [8] Verband Deutscher Papierfabriken e. V., *Tsai-lun*, <https://www.vdp-online.de/presse/mediathek/bilder/geschichte.html>.
- [9] *Technikgeschichte in Einzeldarstellungen: Das Papier gestern - heute - morgen*, Technikgeschichte in Einzeldarstellungen, Vol. 21 (Eds: Verein Deutscher Ingenieure (VDI)), VDI-Verlag, Düsseldorf **1971**.
- [10] K. J. Thomé-Komiensky, *Recycling von Holz-Zellstoff und Papier*, EF-Verlag, Berlin **1987**.
- [11] F. Kittler, *Europäischer Typendruck: Erfolg durch die serielle Herstellung beweglicher Lettern*,
<http://mediengeschichte.dnb.de/DBSMZBN/Content/DE/Buchdruck/04-europaeischer-typendruck.html>.
- [12] Verband Deutscher Papierfabriken e. V., *Papier Kompass 2018*,
https://www.vdp-online.de/fileadmin/Datensammlungen/Statistik/2017/Kompass_dt.pdf
- [13] J. Julius, Untersuchungen zur Entwicklung eines Verfahrens zur Trennung von Papier-Kunststoffgemischen aus Hausmüll unter

besonderer Berücksichtigung unterschiedlicher Festigkeitseigenschaften, *Dissertation*, RWTH Aachen **1983**.

- [14] D. Faßnacht, Papierrückgewinnung aus Haushaltsabfällen, *Dissertation*, Technische Universität Berlin **1978**.
- [15] A. Scholten, D. Meiners **2018**.
- [16] *Papier machen einfach machen: Altpapieraufbereitung*, <https://www.papier-machen.de/papierherstellung/altpapieraufbereitung/>.
- [17] C. Harden Machinery, *Pulper tail from a paper recycling plant*, <http://www.prance.cc/ueditor/asp/upload/2014122263437893.png>.
- [18] Voith Paper GmbH & Co. KG, *Combisorter CSM: Der Endstufensortierer für geringen Faserverlust*, http://voith.com/corpcde/1129_de_03_P03_Combisorter.pdf.
- [19] Voith Paper GmbH & Co. KG, *Hocheffizienter Rejektsortierer für minimalen Faserverlust: IntegraCombisorter*, <https://d2euiyrvxi8z1.cloudfront.net/asset/445934742530/57edd2e0f470e22300495395a81a6e2a>.
- [20] FAN Separator GmbH, *BP - Beltec Schneckenpresse*, <https://www.fan-separator.de/de/produkte/pressen-beltec/bp-426>.
- [21] H. Saechtling, E. Baur, *Saechtling-Kunststoff-Taschenbuch*, 30th ed., Hanser, München **2007**.
- [22] C. Hopmann, W. Michaeli, *Einführung in die Kunststoffverarbeitung*, 7th ed., Hanser eLibrary, Hanser, München **2015**.
- [23] G. Menges, *Werkstoffkunde Kunststoffe*, 5th ed., Studentexte Kunststofftechnik, Hanser, München **2005**.
- [24] G. W. Ehrenstein, *Faserverbund-Kunststoffe: Werkstoffe - Verarbeitung - Eigenschaften*, 2nd ed.
- [25] C. M. Hansen, The Three Dimensional Solubility Parameter And Solvent Diffusion Coefficient: Their Importance In Surface Coating Formulation, Danmarks tekniske Højskole **1967**.
- [26] H. L. Lee, P. Luner, *Journal of Wood Chemistry and Technology* **1991**, 11 (2), 247.
- [27] D. M. Koenhen, C. A. Smolders, *Journal of Applied Polymer Science* **1975**, 19, 1163.
- [28] C. M. Hansen, *Industrial & engineering chemistry product research and development* **1969**, 8 (1), 2.
- [29] D. J. Mania, Correlation of Polymer Performance and Hansen Solubility Parameters, *Masterarbeit*, The University of Southern Mississippi **2016**.
- [30] J. V. Koleske, *Paint and Coating Testing Manual*, Vol. 20, Philadelphia **1995**.

- [31] Y. Li, N. Taulier, A. M. Rauth, X. Y. Wu, *Pharm Res* **2006**, 23 (8), 1877.
- [32] M. Shah, Y. K. Agrawal, K. Garala, A. Ramkishan, *Indian J Pharm Sci* **2012**, 74 (5), 434.
- [33] H. Yamamoto, *Hansen Solubility Parameters (HSP) Application NOtes: Hansen Solubility Parameter (HSP) of TiO₂*, [https://www.pirika.com/NewHP/PirikaE/TiO₂.html](https://www.pirika.com/NewHP/PirikaE/TiO2.html).
- [34] *HSP Examples: Nanoparticles*, <https://www.hansen-solubility.com/HSP-examples/nanoparticles.php>.
- [35] Markus Sebastian Agerer, *Schnitt durch einen gegenläufigen Doppelschnecken-Extruder*, <http://www.maschinenbau-wissen.de/bilder/skripte/kunststofftechnik/doppelschnecken-extruder-21-.PNG>.
- [36] W. Michaeli, *Einführung in die Kunststoffverarbeitung*, 5th ed., Hanser, München u.a **2006**.
- [37] H. Jung, J. Kappen, A. Hesse, B. Götz, *Wochenblatt für Paoierfabrikation* **2014** (10), 628.
- [38] J. Sommer, R. Trumpf, A. Haas, in *Berliner Abfallwirtschafts- und Energiekonferenz*.
- [39] C. Dornack, W. Dietz, F. Schütt, *Reststoffe der Papierindustrie: Ungenutzte Biomasse?*, Depotech 2014, Leoben **04. - 07.11.14**.
- [40] J. Thöming, M. Baune, W. Veltzke, R. Brückner, *Papierschaumplatten auf Basis von recyceltem Papierstaub: Material- und Verfahrensentwicklung*, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart **2013**.
- [41] D. N.-S. Hon, S. T. Sean, *Journal of Thermoplastic Composite Materials* **1991**, 4, 300.
- [42] A. R. Sanadi, R. A. Young, C. Clemons, R. M. Rowell, *Journal of Reinforced Plastics and Composites* **1994**, 13, 54.
- [43] I. Baroulaki et al., *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* **2006**, 37 (10), 1613.
- [44] M. S. Huda et al., *Journal of Material Science* **2005**, 40, 4221.
- [45] M. S. Huda, L. T. Drzal, A. K. Mohanty, M. Misra, *Composites Science and Technology* **2006**, 66 (11-12), 1813.
- [46] D. Maldas, B. V. Kokta, *Journal of Adhesion Science and Technology* **1994**, 8 (12), 1439.
- [47] S. Ren, D. N.-S. Hon, *Journal of Reinforced Plastics and Composites* **1993**, 12, 1311.
- [48] G. E. Myers, C. M. Clemons, J. J. Balatinecz, R. T. Woodhams, *Proceedings of the 1992 annual condence of the Society of Plastics Engineering (SPE/ANTEC)* **1992**, 1, 602.

-
- [49] P. Yadav, A. Nema, S. Varghese, S. K. Nema, *Polymer Engineering and Science* **1999**, 39 (8), 1550.
 - [50] A. R. Sanadi, D. F. Caulfield, R. M. Rowell, *Journal of Plastics Engineering* **1994**, 27.
 - [51] H. Kröling et al., in *ECCM16*.
 - [52] H. Kröling et al., in *ICCM19*.
 - [53] N. Nubbo, J. Fleckenstein, A. Büter, H. Kröling, in *ZELLCHEMING-Hauptversammlung 2013*.
 - [54] W. Kempkens, *Forscher arbeiten an Auto- und Fahrradteilen aus Papier*, <https://www.wiwo.de/technologie/green/werkstoffe-forscher-arbeiten-an-auto-und-fahrradteilen-aus-papier/13548916.html> **2014**.
 - [55] I. Ohsawa et al., in *10th Japan International SAMPE Symposium*.
 - [56] H. Großmann et al., *Entwicklung eines Recyclingverfahrens für Reststoffe aus der Papiererzeugung zur Herstellung von Bioverbundstoffen: Abschlussbericht IGD-Forschungsvorhaben NR. 17434 BR*, Kuratorium für Forschung und Technik der Zellstoff- und Papierindustrie im VDP e.V. **2014**.
 - [57] F. Tilch, P.-G. Weber, A. Groß, M. Kühne, *Verarbeitung von faserhaltigen Reststoffen des Papierproduktionsprozesses in naturfaserverstärkten Kunststoffen: Abschlussbericht zum Vorhaben, Az: 32045 gefördert von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt* **2016**.
 - [58] J. Dispan, *Papierindustrie in Deutschland: Branchenreport 2013*, Informationsdienst des IMU-Institut, H. 2013,2, IMU-Inst., Stuttgart **2013**.
 - [59] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., *Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 2: Prüfbedingungen für Form- und Extrusionsmassen*, Beuth Verlag GmbH, Berlin **1996**, 83.080.00 (527-2).
 - [60] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., *Kunststoffe - Bestimmung der Charpy-Schlageigenschaften - Teil 1: Nicht instrumentierte Schlagzähigkeitsprüfung*, Beuth Verlag GmbH, Berlin **2006**, 83.080.01 (179-1).
 - [61] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., *Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 4: Prüfbedingungen für isotrop und anisotrop faserverstärkte Kunststoffverbundwerkstoffe*, Beuth Verlag GmbH, Berlin **1997**, 83.120 (527-4).
 - [62] M. Döll, *Charpy impact test sketch*, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Charpy_impact_test_sketch.svg **2007**.
 - [63] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., *Kunststoffe - Dynamische Differenz-Thermoanalyse (DSC) - Teil 1: Allgemeine Grundlagen*, Beuth Verlag GmbH, Berlin **2010**, 83.080.01 (11357-1).

- [64] G. W. Ehrenstein, G. Riedel, P. Trawiel, *Praxis der thermischen Analyse von Kunststoffen*, Hanser, München, Wien **1998**.
- [65] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., *Kunststoffe - Thermogravimetrie (TG) von Polymeren*, Beuth Verlag GmbH, Berlin **2014**, 83.080.01 (11358).
- [66] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., *Hochleistungskeramik - Keramische Verbundwerkstoffe - Thermophysikalische Eigenschaften - Teil 4: Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit*, Beuth Verlag GmbH, Berlin **2004**, 81.060.30 (1159-4).
- [67] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., *Kunststoffe - Polymere/Harze in flüssigem, emulgierten oder dispergierten Zustand- Bestimmung der Viskosität in einem Rotationsviskosimeter bei definiertem Geschwindigkeitsgefälle*, Beuth Verlag GmbH, Berlin **1994**, 83.080.00 (3219).
- [68] ASTM International, *Standard Test Method for Spiral Flow of Low-Pressure Thermosetting Molding Compounds* **1999** (D 3123).
- [69] M. Dickert, G. Ziegmann, *Abschlussbericht Forschungsvorhaben NF-Guidelines: Erstellung von Konstruktionsregelwerken für das Spritzgießen und Formpressen von naturfaserverstärkten Kunststoffen* **2009**.
- [70] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., *Kunststoffe - Bestimmung der Wasseraufnahme*, Beuth Verlag GmbH, Berlin **2008**, 83.080.01 (62).
- [71] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., *Kunststoffe - Bestimmung der Einwirkung von Mikroorganismen auf Kunststoffe*, Beuth Verlag GmbH, Berlin **1997**, 07.100.99 (846).
- [72] A. Malfatti, Evaluation neuer Haftvermittlersysteme für flachfaserverstärktes Polypropylen, *Masterarbeit*, Technische Universität Clausthal **2015**.
- [73] Del Fanti, N. A., Thermo Fisher Scientific, *IR Spectroscopy of Polymers*, Madison **2008**.
- [74] S.-B. Lüer, Untersuchung der Auswirkungen der Kontamination eines Spuckstoffs aus dem Altpapierrecycling auf die mechanischen Eigenschaften daraus hergestellter Polypropylen-Compounds, *Forschungspraktikum*, Technische Universität Clausthal **2018**.
- [75] A. Abdelfattah, Evaluation of production-related variations in the mechanical properties of waste paper reinforced polypropylene, *Bachelorarbeit*, Technische Universität Clausthal **2019**.
- [76] H. Tas, Chemische und thermogravimetrische Untersuchung eines Altpapierzyklats als alternative Faserverstärkung, *Forschungsbericht*, Technische Universität Clausthal **2016**.
- [77] M. Tsuboi, *Journal of Polymer Science* **1957**, 25, 159.

-
- [78] I. Bykov, Characterization of Natural and Technical Lignins using FTIR Spectroscopy, *Masterarbeit*, Luleå University of Technology **2008**.
- [79] H. Yang et al., *Fuel* **2007**, 86 (12-13), 1781.
- [80] Braskem, *Data Sheet Polypropylene H734-52RNA* **2012**.
- [81] V. N. Tsvetkov, K. A. Adrianov, M. G. Vitovskaja, *Soedin* **1972**, 14, 369.
- [82] B. Ke, *Newer methods of polymer characterization* **1964**.
- [83] I. N. Shtennikova, T. V. Peker, T. I. Garmonova, *Soedin* **1981**, 23, 2510.
- [84] T. I. Garmonova, M. G. Vitovskaja, P. N. Lavrenko, *Soedin* **1971**, 13, 884.
- [85] Polymerdatabase.com, *Average Partial Solubility Parameters*, <http://polymerdatabase.com/polymer%20physics/Hansen%20Solubility%20Sphere.html>.
- [86] G. W. Ehrenstein, S. Pongratz, *Beständigkeit von Kunststoffen*, Edition Kunststoffe, Hanser, München **2007**.
- [87] J. Hepperle, in *Polymeraufbereitung 2002: Technischer Fortschritt zur Steigerung von Leistung und Produktqualität* (Eds: Verein Deutscher Ingenieure (VDI)), VDI-Verl. Düsseldorf **2002**.
- [88] M. I. Kohan, *Nylon Plastics Handbook*, Hanser/Gardner Publications, Cincinnati, Ohio **1995**.
- [89] K. Plaschkies, *Prüfbericht Auftrags-Nr. 2218027-A1, Prüfbericht*, Dresden **2018**.
- [90] T. Probst, *bvse-Marktbericht: Kunststoffe Dezember 2018*, Bonn **2018**.
- [91] R. Engelhardt, J. Schröder, Untersuchung der Wirtschaftlichkeit der Aufbereitung von Spuckstoffen aus dem Altpapierrecycling und ihrer Weiterverarbeitung zu Compounds, *Projektarbeit*, Technische Universität Clausthal **2019**.
- [92] Hagebau Handelsgesellschaft für Baustoffe mbH & Co. KG, *Fassaden-Journal: Häuser gestalten und Energie sparen mit vorgehängten Fassaden*, https://www.hagebau.com/content/service/brochurecenter/holzbau/journale/fassadenjournal_2012.pdf **2012**.
- [93] SpritzgussWeb, *Teilekalkulation: Excel-Datei*, <https://www.spritzgussweb.de/2018Information.htm> **2019**.
- [94] ARBURG GMBH + Co KG, *Datenblatt Allrounder 320 C* **2018**, https://www.arburg.com/fileadmin/redaktion/Mediathek/Technische_Daten/ARBURG_ALLROUNDER_320C_GOLDEN_EDITION_TD_523870_de.pdf#page=1&zoom=auto,-274,632 (22.01.2019).

- [95] Rathscheck Schiefer und Dach-Systeme - ZN der Wilh. Werhahn KG Neuss, *Welche Vorteile bietet eine Schieferfassade und wie hoch sind die Kosten?*, <https://blog.rathscheck.de/welche-vorteile-bietet-eine-schieferfassade-und-wie-hoch-sind-die-kosten>.
- [96] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., *Studie zur Markt- und Preissituation bei Naturfasern: (Deutschland und EU)*, Gülzow **2000**.
- [97] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), *Bioverbundwerkstoffe: Naturfaserverstärkte Kunststoffe (NFK) und Holz-Polymer-Werkstoffe (WPC)*.
- [98] *Studie zur Markt- und konkurrenzsituation bei Naturfasern und Naturfaser-Werkstoffen (Deutschland und EU)*, Gülzower Fachgespräche, Vol. 26 (Eds: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR)), Düsseldorf **2008**.
- [99] S. Lohan, Validieren und Testen von Materialien für den Einsatz in Helmen im Bereich Bergsport, *Masterarbeit*, Technische Universität Clausthal **2017**.
- [100] C2P Germany GmbH, *Technische Produktioninformation Cepylen 8103N* **2008**.
- [101] C2P Germany GmbH, *Technische Produktinformation Cepylen 8T223N* **2012**.
- [102] P. M. McGenity et al., *Polymer* **1992**, 33 (24), 5215.
- [103] J. Schöne, I. Kotter, W. Grellmann, *Journal of Plastics Technology* **2012** (8), 231.
- [104] A. O, B. Y, H. N, M. N, *Polym Sci* **2017**, 03 (02).
- [105] Abu Bakar, M. B., Y. W. Leong, A. Ariffin, Mohd Ishak, Z. A., *Journal of Applied Polymer Science* **2008**, 110 (5), 2770.
- [106] K. Shelesh-Nezhad, A. Taghizadeh, *Polym. Eng. Sci.* **2007**, 47 (12), 2124.
- [107] K. Bose, J. Ganguly, *American Mineralogist* **1994** (79), 692.
- [108] JELU-WERK J. Ehrler GmbH & Co. KG, *WPC von JELU – Anwendungsbeispiele*, <https://www.jeluplast.com/wpc/produkte/jeluplast-dt/anwendungen/>.
- [109] Biowert Industrie GmbH, *Datenblatt AgriPlast NFPP 3070/40000HM*.
- [110] Tecnaro GmbH, *Werkstoffdaten der Type ARBOFILL Fichte* **2014**.
- [111] JELU-WERK J. Ehrler GmbH & Co. KG, *Produktdatenblatt WPC PP H50-500-14 (12 H)*.
- [112] E. Heger, *Produktbeschreibung Hechelband Kammzug Flachs bzw. Leinen aus Langflachs Tauröste mind. 0,2 kg: Art-Nr: 91591*, <http://shop.flachs.de/produkt/flachs-hechelband-langflachs-tauroste/#!prettyPhoto>.
- [113] V. Schwinn, *Preis AgriPlast NFPP 3070/40000 HM, E-Mail* **2019**.

- [114] H. Metzner, *Preis Jelu WPC, E-Mail* **2019**.
- [115] S. Sdrenka, *Preis Arbofill bei einer Abnahmemenge von 500 kg, persönliches Gespräch* **2019**.
- [116] Cortec GmbH, *Cortec goes grass: Wir setzen auf nachwachsende Rohstoffe*, <https://www.cortec-kleiderbuegel.de/kleiderbuegel/bio/>.
- [117] noThrow Design, *Produktseite "GRPL"*, <https://nothrowdesign.com/product/grpl/>.
- [118] Ammer Ag, *Ammer UP Dosen 1004 - 1005 -1066: Das Original... ... seit 1966 - mit verbesserter Geometrie für den Einbau in brennbare Wände und Hohlwände und neu aus umweltschonendem AGRIPLAST®*, https://ammer.ch/pdf/2018-10-12_DB_1004-1005-1066_COMBO.pdf **2018**.
- [119] A. Antony, *Aufbereitung eines Spuckstoffes aus dem Altpapierrecycling zum Einsatz als Füllstift in thermoplastischen Matrixsystemen, Projektarbeit*, Technische Universität Clausthal **2018**.
- [120] S. Anschütz, *Konstruktion und Aufbau eines Stoffselektierers für Kleinstfaserstoffe im Bereich der Papieraufbereitung, Bachelorarbeit*, Technische Universität Clausthal **2018**.
- [121] A. Scholten, S.-B. Luer, D. Meiners, in *CZM-Berichtsband 2018*.
- [122] Scholten, Andrea Franziska Katharina, D. Meiners, in *PROCEEDINGS OF THE EUROPE/AFRICA CONFERENCE DRESDEN 2017 – POLYMER PROCESSING SOCIETY PPS*, Vol. 2055 (Eds: U. Wagenknecht, P. Pötschke, S. Wiessner, M. Gehde) **2017**.
- [123] H. Park et al., *Energies* **2015**, 8 (8), 8704.
- [124] P. Yao, S. Zhong, Z. Shen, *International Journal of Photoenergy* **2015**, 2015 (5), 1.
- [125] C. Reichardt, *Chem. Rev.* **1994**, 94 (8), 2319.
- [126] C. M. Hansen, A. Björkman, *Holzforschung* **1998**, 52 (4), 335.
- [127] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., *Analysesiebe - Technische Anforderungen und Prüfung Teil 1: Analysesiebe mit Metalldrahtgewebe*, Beuth Verlag GmbH, Berlin **2017**, 19.120 (3310).
- [128] S. Reich-Albrecht, *Einstellen eines definierten Eigenschaftsprofils in naturfaserverstärkten Verbundwerkstoffen durch chemische Modifikation der Naturfasern*, 1st ed., Papierflieger Verlag GmbH, Clausthal-Zellerfeld **2015**.
- [129] A. Elsabbagh, *Processing and optimising the mechanical and physical properties of natural fibre reinforced polypropylene composites*, Materialwissenschaft und Werkstofftechnik 2,

- Polymerwerkstoffe und Kunststofftechnik, Band 19, Papierflieger Verlag GmbH, Clausthal-Zellerfeld **2017**.
- [130] A. K. Bledzki, S. Reihmane, J. Gassan, *Journal of Applied Polymer Science* **1996**, 59, 1329.
 - [131] F. P. La Mantia, M. Morreale, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* **2011**, 42 (6), 579.
 - [132] Y. Xie et al., *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* **2010**, 41 (7), 806.
 - [133] Kometra GmbH, *SCON TPPP 8012 FA: Carboxyliertes Polypropylen (Maleinsäureanhydrid)*.
 - [134] A. Scholten, N. Plogmann, D. Meiners, *KEM* **2017**, 742, 25.
 - [135] Sigma-Aldrich, *Polypropylene-graft-maleic anhydride*, <https://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/427845?lang=de®ion=DE>.
 - [136] J. Garlinsky, *Preisauskunft SCONA TPPP 8012 FA, Telefonat* **2019**.

11.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1:	Tsai Lun, der Erfinder des Papiers [8]	3
Abbildung 2.2:	Ausbreitung der Papierherstellung von China nach Europa (in Anlehnung an [7])	4
Abbildung 2.3:	Durchschnittliche Zusammensetzung von Papier von 1800 bis 2017 [[7], [9], [12]]	6
Abbildung 2.4:	Erste bildliche Darstellung eines Holländers: Fig. 1: Messerwalze zum groben Zerreißen der Lumpen; Fig. 2: Messerwalze zum Feinmahlen [7]	7
Abbildung 2.5:	Schematischer Ablauf des Papierrecyclings	10
Abbildung 2.6:	Fließschema des Papierrecyclings nach [15]	11
Abbildung 2.7:	Querschnitt durch einen Pulper nach [16]	11
Abbildung 2.8:	Aus dem Pulper entnommener Zopf [17]	12
Abbildung 2.9:	Aufbau eines Combisorters nach [18]	13
Abbildung 2.10:	FAN-Presse [20]	14
Abbildung 2.11:	Vereinfachtes Produktionsflussbild der industriellen Papierproduktion nach [7]	14
Abbildung 2.12:	Weltweites Produktionsvolumen verschiedener Werkstoffe (Kunststoffe inkl. Fasern, Lacke, etc.) nach [21]	15
Abbildung 2.13:	Schematischer molekularer Aufbau von Thermoplasten, Elastomeren und Duromeren nach [22]	16
Abbildung 2.14:	Aufbau linearer und verzweigter Thermoplaste nach [23]	16
Abbildung 2.15:	Darstellung des Hansen-Parameters als Koordinate im dreidimensionalen Raum	20
Abbildung 2.16:	Prozessablauf zur Herstellung von Bauteilen aus faserverstärktem Kunststoff	21
Abbildung 2.17:	Schematische Darstellung eines einfachen Doppelschneckenextruders zur Einarbeitung von Fasern in thermoplastische Matrixsysteme (in Anlehnung an [35])	22
Abbildung 2.18:	Schematische Darstellung eines Laborkneters, in Anlehnung an [21]	23
Abbildung 2.19:	Spritzgusszyklus in Anlehnung an [36]	24
Abbildung 3.1:	Von BAROULAKI et al. hergestellter Probekörper aus Zeitungspapier und HDPE [43]	29
Abbildung 4.1:	Probekörperform für Kunststoffe (Zugprüfung oben, Schlagzähigkeit, unten) nach [59] und [60]	35

Abbildung 4.2:	Beispielhafte Spannungs-Dehnungsdiagramme für Kunststoffe (a: spröder Kunststoff, b: zäher Kunststoff, c: verstretchbarer Kunststoff, d und e: weichgemachter Kunststoff) [21].....	37
Abbildung 4.3:	Prinzipdarstellung des Schlagbiegeversuchs nach CHARPY (nach[62]).....	39
Abbildung 4.4:	Beispielhafte DSC-Messkurve mit verschiedenen Phasenübergängen und bestimmaren Temperaturen (nach [23])	40
Abbildung 4.5:	Prinzipieller Aufbau einer DSC (nach [63]).....	41
Abbildung 4.6:	Schematische Darstellung einer TGA (nach [64])	42
Abbildung 4.7:	TGA-Kurven für Polystyrol (oben: Masse gegen Temperatur, unten: Masse gegen Zeit).....	44
Abbildung 4.8:	Möglichkeiten der Auswertung einer TGA-Kurve. Blau: Auswertung über Wendepunkt. Grün: Auswertung von Anfangs-, End- und Mittenpunkt. (in Anlehnung an [64])	45
Abbildung 4.9:	Schematischer Aufbau zur Messung der Wärmeleitfähigkeit.....	46
Abbildung 4.10:	Prinzipdarstellung eines Platte-Platte-Rheometers (in Anlehnung an [23]).....	47
Abbildung 4.11:	Werkzeug zur Herstellung von Fließspiralen laut Norm (links) [68] und als Spritzgusswerkzeug (rechts) [69]	47
Abbildung 4.12:	Prinzipdarstellung der Wasseraufnahme über die Zeit bis hin zur Sättigung (max.)	49
Abbildung 4.13:	Schematische Darstellung des Funktionsprinzips eines ATR-IR-Spektrometers (erweitert nach [72]) 54	
Abbildung 4.14:	Beispielhaftes ATR-IR-Transmissionsspektrum für Polypropylen (nach [73])	55
Abbildung 5.1:	Lichtmikroskopische Aufnahme des Spuckstoffs nach dem Sieben bei 100-facher Vergrößerung [76].	58
Abbildung 5.2:	IR-Spektren mehrerer Faserproben des Spuckstoffes nach [76].....	59
Abbildung 5.3:	TGA-Kurven und abgeleitete TGA-Kurven der Bestandteile des Spuckstoffes.....	62
Abbildung 5.4:	Lichtmikroskopische Aufnahmen des Spuckstoffes bei 200-facher Vergrößerung	63

Abbildung 6.1:	Elastizitätsmodul der Compounds mit PP und PA in Abhängigkeit vom Füllstoffgehalt.....	70
Abbildung 6.2:	Zugfestigkeit der Compounds mit PP und PA in Abhängigkeit vom Füllstoffgehalt.....	72
Abbildung 6.3:	Maximale Dehnung der Compounds mit PP und PA in Abhängigkeit vom Füllstoffgehalt.....	73
Abbildung 6.4:	Grafische Darstellung der HANSEN-Parameter von PP, PA und Cellulose	75
Abbildung 6.5:	CHARPY-Schlagzähigkeit der Compounds mit PP und PA in Abhängigkeit vom Füllstoffgehalt.....	75
Abbildung 6.6:	DSC-Kurve des Compounds mit 80 w-% PP und 20 w-% Füllstoff	77
Abbildung 6.7:	Schmelztemperaturen der Compounds mit PP bzw. PA	77
Abbildung 6.8:	Schmelzenthalpien (links) und normierte Schmelzenthalpien (rechts) der Compounds mit PP bzw. PA.....	78
Abbildung 6.9:	Schmelztemperaturen der PA-Compounds bei 275 °C und 325 °C Maximaltemperatur.....	79
Abbildung 6.10:	Schmelzenthalpien der PA-Compounds bei 275 °C und 325 °C Maximaltemperatur.....	79
Abbildung 6.11:	Reaktionsgleichungen der Hydrolyse von Polyamid nach [87]	80
Abbildung 6.12:	TGA-Kurve (durchgezogen) des Compounds mit 50 w-% PP und 50 w-% Spuckstoff sowie Ableitung der TGA-Kurve nach der Temperatur (gestrichelt)	81
Abbildung 6.13:	TGA-Kurven des Compounds mit 50 w-% PP und 50 w-% Spuckstoff sowie des PP und des Spuckstoffes	82
Abbildung 6.14:	TGA-Kurven von PA und der Compounds mit PA	83
Abbildung 6.15:	Nach der Temperatur abgeleitete TGA-Kurven von PA und der Compounds mit PA.....	83
Abbildung 6.16:	Wärmeleitfähigkeiten der Compounds mit PP bzw. PA bei 50 °C	84
Abbildung 6.17:	Foto einer Probe aus PA und 10 w-% Spuckstoff	85
Abbildung 6.18:	komplexe Viskosität der Compounds mit PP	86
Abbildung 6.19:	komplexe Viskosität der Compounds mit PA.....	87
Abbildung 6.20:	Viskosität der Compounds mit PP bzw. PA bei 100 rad/s in Abhängigkeit des Füllstoffgehaltes ..	87

Abbildung 6.21:	Fließweglängen der Compounds mit PP bei verschiedenen Einspritzdrücken	89
Abbildung 6.22:	Fließweglängen der Compounds mit PA bei verschiedenen Einspritzdrücken	89
Abbildung 6.23:	Wasseraufnahme der Compounds mit PP oder PA nach 150 min Lagerung in siedendem Wasser....	90
Abbildung 6.24:	Bewertung des Schimmelbewuchses der Compounds mit PP in Abhängigkeit des Füllstoffgehaltes und der Prüfdauer in Wochen nach Verfahren A	91
Abbildung 6.25:	Bewertung des Schimmelbewuchses der Compounds mit PA in Abhängigkeit des Füllstoffgehaltes und der Prüfdauer in Wochen nach Verfahren A	92
Abbildung 6.26:	Bewertung des Schimmelbewuchses der Compounds mit PP in Abhängigkeit des Füllstoffgehaltes und der Prüfdauer in Woche nach Verfahren B	93
Abbildung 6.27:	Bewertung des Schimmelbewuchses der Compounds mit PA in Abhängigkeit des Füllstoffgehaltes und der Prüfdauer in Woche nach Verfahren B	93
Abbildung 6.28:	Proben aus PP und 50 w-% Spuckstoff nach 4 Wochen im Brutschrank (links Verfahren A, rechts Verfahren B) nach [89]	94
Abbildung 6.29:	Flussdiagramm zur Herstellung von Bauteilen aus Spuckstoff-Compounds mit den notwendigen Verarbeitungsschritten	95
Abbildung 6.30:	Berechnung der Trocknungskosten	97
Abbildung 6.31:	Berechnung der Zerkleinerungskosten	98
Abbildung 6.32:	Verlauf des Preises für die Compounds aus PP bzw. PA in Abhängigkeit vom Füllstoffgehalt	99
Abbildung 6.33:	Geometriebeispiel für ein Fassadenelement aus Spuckstoff-Compounds.....	102
Abbildung 6.34:	z.T. durch Schimmel und andere Mikroorganismen angegriffene Holzschindeln.....	102
Abbildung 6.35:	Übersicht zu berücksichtigender Kosten bei der Kalkulation eines Spritzgussbauteils (Preis Spritzgussmaschine nach [94])	103

Abbildung 6.36:	Aus 10 w-% (links) bzw. 30 w-% (rechts) Spuckstoff und 90 w-% bzw. 70 w-% PP hergestellte Box	106
Abbildung 6.37:	Elastizitätsmodul der Compounds mit rPP und rPA in Abhängigkeit vom Füllstoffgehalt.....	113
Abbildung 6.38:	Zugfestigkeit der Compounds mit rPP und rPA in Abhängigkeit vom Füllstoffgehalt.....	114
Abbildung 6.39:	Elastizitätsmodul und Zugfestigkeit der Recycling-Compounds in Vergleich mit Neumaterial-Compounds	115
Abbildung 6.40:	CHARPY-Schlagzähigkeit der Compounds mit rPP und rPA in Abhängigkeit vom Füllstoffgehalt.....	116
Abbildung 6.41:	CHARPY-Schlagzähigkeit der Neumaterialien und der Recyclingmaterialien im Vergleich	118
Abbildung 6.42:	Schmelztemperatur der Compounds aus rPP und rPA in Abhängigkeit des Füllstoffgehaltes	119
Abbildung 6.43	Schmelzenthalpie (links) und auf den Kunststoffgehalt normierte Schmelzenthalpie (rechts) der Compounds aus rPP und rPA in Abhängigkeit des Füllstoffgehaltes	119
Abbildung 6.44:	TGA-Kurven der Recyclingkunststoffe ohne Spuckstoff	120
Abbildung 6.45:	TGA-Kurven der Compounds mit rPP roh	121
Abbildung 6.46:	TGA-Kurven der Compounds mit rPA	122
Abbildung 6.47:	Wärmeleitfähigkeit der Compounds aus rPP und rPA in Abhängigkeit des Füllstoffgehaltes	122
Abbildung 6.48:	Viskositäten der Compounds aus Spuckstoff und den Recyclingkunststoffen bei einer Winkelfrequenz von 100 rad/s	124
Abbildung 6.49:	Fließweglänge der Compounds mit rPP und rPA	125
Abbildung 6.50:	Fließweglänge der Compounds mit rPA in Abhängigkeit vom Füllstoffgehalt bei verschiedenen Einspritzdrücken.....	126
Abbildung 6.51:	Wasseraufnahme der Compounds mit Recycling-PP im Vergleich mit neuem PP	126
Abbildung 6.52:	Wasseraufnahme der Compounds mit Recycling-PA im Vergleich mit neuem PA	127
Abbildung 6.53:	Bewertung des Schimmelbewuchses der Compounds mit Recyclingmaterial und 30 w-%	

	Füllstoff (Verfahren A unschraffiert, Verfahren B schraffiert)	128
Abbildung 6.54:	Preise der Compounds aus Spuckstoff und Recyclingkunststoffen in Abhängigkeit des Füllstoffgehaltes	130
Abbildung 6.55:	Elastizitätsmodul der Referenzmaterialien in Abhängigkeit vom Füllstoffgehalt	135
Abbildung 6.56:	Zugfestigkeit der Referenzmaterialien in Abhängigkeit vom Füllstoffgehalt	136
Abbildung 6.57:	maximale Dehnung der Referenzmaterialien in Abhängigkeit vom Füllstoffgehalt	137
Abbildung 6.58:	Charpy-Schlagzähigkeit der Referenzmaterialien in Abhängigkeit vom Füllstoffgehalt	137
Abbildung 6.59:	Schmelztemperatur der Referenzmaterialien in Abhängigkeit vom Füllstoffgehalt	138
Abbildung 6.60:	Schmelzenthalpie der Referenzmaterialien und normierte Schmelzenthalpie der Flachs-Compounds in Abhängigkeit vom Füllstoffgehalt	139
Abbildung 6.61:	TGA-Kurve der Compounds aus Flachs und PP	140
Abbildung 6.62:	TGA-Kurve der Compounds aus Flachs und PA	140
Abbildung 6.63:	TGA-Kurve und abgeleitete TGA-Kurve von Flachs	142
Abbildung 6.64:	TGA-Kurve und abgeleitete TGA-Kurve des Jelu WPC	143
Abbildung 6.65:	Viskositäten der Referenzmaterialien bei 100 rad/s in Abhängigkeit des Füllstoffgehaltes	144
Abbildung 6.66:	Fließweglänge der Flachs-Compounds in Abhängigkeit vom Füllstoffgehalt und Einspritzdruck.....	145
Abbildung 6.67:	Fließweglänge der kommerziellen NFK in Abhängigkeit vom Einspritzdruck.....	145
Abbildung 6.68:	Wasseraufnahme der Referenzmaterialien	146
Abbildung 6.69:	Preise der Compounds aus Flachs und PP bzw. PA in Abhängigkeit des Füllstoffgehaltes.....	150
Abbildung 6.70:	Türinnenverkleidung aus NFK [[97]]	150
Abbildung 6.71:	Preise der Compounds aus PP und PA mit Flachs bzw. Spuckstoff im Vergleich	152
Abbildung 7.1:	Zusammensetzung des Füllstoffs zur gezielten Kontamination des Spuckstoffes mit EPS und Holz [121]	155

Abbildung 7.2:	Aufbau (a) und Ablauf (b – d) der Soxhlet-Extraktion	156
Abbildung 7.3:	IR-Spektren der gereinigten Fasern und Cellulose	158
Abbildung 7.4:	IR-Spektren der aus der Soxhlet-Extraktion erhaltenen Extrakte.....	158
Abbildung 7.5:	Grafische Auftragung der HANSEN-Parameter der Lösungsmittel und möglicher Komponenten des Spuckstoffes	163
Abbildung 7.6:	Sieblinie und erhaltene Fraktionen (nach [[120]]	165
Abbildung 7.7:	Aufbau eines Zick-Zack-Sichters und Trennprinzip	166
Abbildung 7.8:	Entwickelte Konstruktion zur Trennung von Faserstoff und Störstoffen [120]	169
Abbildung 7.9:	Sieb (ca. 1 mm Maschenweite) nach dem ersten Probelauf pulperseitig (links) und pumpenseitig (rechts) [120].....	170
Abbildung 7.10:	Mit der entwickelten Konstruktion aufbereiteter Stoff [120]	171
Abbildung 7.11:	Elastizitätsmodul der Compounds aus PP und mechanisch behandeltem Spuckstoff in Abhängigkeit des Füllstoffgehaltes	173
Abbildung 7.12:	Zugfestigkeit der Compounds aus PP und mechanisch behandeltem Spuckstoff in Abhängigkeit des Füllstoffgehaltes	174
Abbildung 7.13:	Elastizitätsmodul der PP-Compounds mit 30 w-% Spuckstoff (kontaminiert, verschiedene Produktionstage, chemisch gereinigt)	175
Abbildung 7.14:	Zugfestigkeit der PP-Compounds mit 30 w-% Spuckstoff (kontaminiert, verschiedene Produktionstage, chemisch gereinigt)	176
Abbildung 7.15:	CHARPY-Schlagzähigkeit der Compounds aus PP und mechanisch behandeltem Spuckstoff in Abhängigkeit des Füllstoffgehaltes	179
Abbildung 7.16:	CHARPY-Schlagzähigkeit der PP-Compounds mit 30 w-% Spuckstoff (kontaminiert, verschiedene Produktionstage, chemisch gereinigt)	180
Abbildung 7.17:	mikroskopische Aufnahme einer Probe mit 5 w-% EPS und 3 w-% Holz	181

Abbildung 7.18:	zweite Aufheizkurve der Compounds aus PP und 30 w-% Spuckstoff, der z.T. gereinigt oder gezielt mit EPS kontaminiert wurde	183
Abbildung 7.19:	TGA-Kurve der Compounds aus PP und 30 w-% zerkleinertem bzw. im Schwimm-Sink-Verfahren aufbereitetem Spuckstoff	184
Abbildung 7.20:	TGA-Kurven der Compounds aus PP und 30 w-% Spuckstoff mit unterschiedlichen Holzgehalten .	185
Abbildung 7.21:	Viskosität der Compounds aus zerkleinertem und nicht zerkleinertem Spuckstoff und PP bei 100 rad/s in Abhängigkeit des Füllstoffgehaltes	186
Abbildung 7.22:	Fließweglänge der Compounds mit PP und zerkleinertem bzw. nicht zerkleinertem Spuckstoff in Abhängigkeit vom Füllstoffgehalt und vom Einspritzdruck.....	187
Abbildung 7.23:	Viskositätskurven der Compounds mit PP und Spuckstoff verschiedener Produktionstage sowie vollständig von Störstoffen befreiten Papierfasern	188
Abbildung 7.24:	Berechnung der Kosten zur Pelletierung und Trocknung des Spuckstoffs nach [91].....	190
Abbildung 7.25:	Chemische Struktur von MAPP [72]	192
Abbildung 7.26:	Reaktion von MAPP mit Naturfasern [72]	193
Abbildung 7.27:	Elastizitätsmodul der Compounds mit PP und MAPP in Abhängigkeit vom Füllstoffgehalt	195
Abbildung 7.28:	Zugfestigkeit der Compounds mit PP und MAPP in Abhängigkeit vom Füllstoffgehalt (links) und gegen die Zugfestigkeit ohne MAPP aufgetragen (rechts)	196
Abbildung 7.29:	Elastizitätsmodul und Zugfestigkeit der Compounds mit unterschiedlichen Gehalten MAPP im Vergleich	196
Abbildung 7.30:	CHARPY-Schlagzähigkeit der Compounds mit PP und MAPP in Abhängigkeit vom Füllstoffgehalt .	197
Abbildung 7.31:	Schmelztemperatur und normierte Schmelzenthalpie der Compounds mit PP und MAPP in Abhängigkeit des Füllstoffgehalts	198
Abbildung 7.32:	TGA-Kurve und abgeleitete TGA-Kurve des MAPP	199
Abbildung 7.33:	TGA-Kurven der Compounds mit 3 w-% MAPP	200

Abbildung 7.34:	abgeleitete TGA-Kurven der Compounds mit 3 w-% MAPP	200
Abbildung 7.35:	TGA-Kurven ausgewählter Compounds der Messreihen PP ohne MAPP, PP/0,1x MAPP und PP/3 MAPP	201
Abbildung 7.36:	Viskositäten der Compounds mit und ohne MAPP bei 100 rad/s in Abhängigkeit vom Füllstoffgehalt	202
Abbildung 7.37:	Fließweglänge der mit MAPP in Abhängigkeit vom Füllstoffgehalt und vom Einspritzdruck.....	203
Abbildung 7.38:	Fließweglänge der Compounds der Messreihen mit PP, PP/0,1x MAPP und PP/3 MAPP in Abhängigkeit vom Füllstoffgehalt und dem Einspritzdruck	204
Abbildung 7.39:	Preise der Compounds aus PP, MAPP und Spuckstoff in Abhängigkeit des Füllstoffgehaltes	205
Abbildung 7.40:	kostenbezogene Eigenschaften der Compounds aus PP, Spuckstoff und z.T. MAPP	206
Abbildung 8.1:	Elastizitätsmodul der Compounds mit PP-Matrix.....	209
Abbildung 8.2:	Elastizitätsmodul der Compounds mit PA-Matrix.....	209
Abbildung 8.3:	Zugfestigkeit der Compounds mit PP-Matrix	210
Abbildung 8.4:	Zugfestigkeit der Compounds mit PA-Matrix	210
Abbildung 8.5:	maximale Dehnung der Compounds mit PP-Matrix	211
Abbildung 8.6:	maximale Dehnung der Compounds mit PA-Matrix	212
Abbildung 8.7:	CHARPY-Schlagzähigkeit der Compounds mit PP-Matrix	213
Abbildung 8.8:	CHARPY-Schlagzähigkeit der Compounds mit PA-Matrix	213
Abbildung 8.9:	Schmelzenthalpie der Compounds mit PP-Matrix	215
Abbildung 8.10:	Schmelzenthalpie der Compounds mit PA-Matrix	215
Abbildung 8.11:	TGA-Kurven der Compounds mit PP-Matrix	216
Abbildung 8.12:	TGA-Kurven der Compounds mit PA-Matrix	216
Abbildung 8.13:	Wärmeleitfähigkeit aller gemessenen Compounds bei 50 °C	217
Abbildung 8.14:	Viskositäten der Compounds mit PP-Matrix.....	218
Abbildung 8.15:	Viskositäten der Compounds mit PA-Matrix.....	219

Abbildung 8.16:	Fließweglängen der Compounds mit PP-Matrix in Abhängigkeit von Füllstoffgehalt und Einspritzdruck	220
Abbildung 8.17:	Fließweglängen der Compounds mit PA-Matrix in Abhängigkeit von Füllstoffgehalt und Einspritzdruck	220
Abbildung 8.18:	Wasseraufnahme der Compounds mit PP-Matrix	221
Abbildung 8.19:	Wasseraufnahme der Compounds mit PA-Matrix	222
Abbildung 8.20:	Schimmelbewuchses bei verschiedener Materialien mit 30 w-% Füllstoffanteil (Verfahren A: unschraffiert, Verfahren B: schraffiert)	222
Abbildung 8.21:	Probekörper zur Untersuchung der Schimmelpilzresistenz des Agriplast nach vier Wochen Lagerung im Brutschrank (Verfahren A) [[89]]	223
Abbildung 8.22:	Netzdiagramme der kostenbezogenen Eigenschaften der PP- bzw. rPP-Compounds für 10 w Füllstoffanteil	226
Abbildung 8.23:	Netzdiagramme der kostenbezogenen Eigenschaften der PP- bzw. rPP-Compounds für 30w-% Füllstoffanteil	227
Abbildung 8.24:	Netzdiagramme der kostenbezogenen Eigenschaften der PP- bzw. rPP-Compounds für 50 w-% Füllstoffanteil	228
Abbildung 8.25:	Netzdiagramme der kostenbezogenen Eigenschaften der kommerziellen Referenzmaterialien in Vergleich mit Spuckstoff-PP-Compounds mit identischem Füllstoffanteil .	229
Abbildung 8.26:	Netzdiagramm der kostenbezogenen Eigenschaften der PA- bzw. rPA-Compounds für 10 w Füllstoffanteil	230
Abbildung 8.27:	Netzdiagramm der kostenbezogenen Eigenschaften der PA- bzw. rPA-Compounds für 30w % Füllstoffanteil	231
Abbildung 8.28:	Netzdiagramm der kostenbezogenen Eigenschaften der PA- bzw. rPA-Compounds für 50 w % Füllstoffanteil	231
Abbildung 8.29:	Netzdiagramme der kostenbezogenen Eigenschaften der Spuckstoff- Compounds mit	

	30 w-% Füllstoffgehalt und dem ungefüllten Neumaterial	233
Abbildung 12.1:	Schmelztemperatur (links) und -enthalpie (rechts) der PA-Compounds bei 250 °C Maximaltemperatur 265	
Abbildung 12.2:	Schmelztemperatur (links) und -enthalpie (rechts) der PA-Compounds bei 300 °C Maximaltemperatur 265	
Abbildung 12.3:	Schmelztemperatur (links) und -enthalpie (rechts) der PA-Compounds bei 350 °C Maximaltemperatur 265	
Abbildung 12.4:	Grafischer Vergleich der Wärmeleitfähigkeiten der Compounds mit rPP und PP.....	266
Abbildung 12.5:	Grafischer Vergleich der Wärmeleitfähigkeiten der Compounds mit rPA und PA.....	266
Abbildung 12.6:	komplexe Viskosität der Compounds aus PP und zerkleinertem Spuckstoff gemessen an Probekörpern mit 1 mm Dicke	267
Abbildung 12.7:	komplexe Viskosität der Compounds aus PA und zerkleinertem Spuckstoff gemessen an Probekörpern mit 1 mm Dicke	267
Abbildung 12.8:	Kalkulationstabelle für das Beispiel der Fassadenverkleidung aus dem Compound mit 40 w-% Spuckstoff und 60 w-% PP	268
Abbildung 12.9:	Kalkulationstabelle für das Beispiel der Aufbewahrungsbox aus dem Compound mit 30 w-% Spuckstoff und 70 w-% PP	269
Abbildung 12.10:	komplexe Viskosität der Compounds mit rPP roh mit 2 mm Probendicke	270
Abbildung 12.11:	komplexe Viskosität der Compounds mit rPP 8103N mit 2 mm Probendicke	270
Abbildung 12.12:	komplexe Viskosität der Compounds mit rPP 8T223N mit 2 mm Probendicke	271
Abbildung 12.13:	komplexe Viskosität der Compounds mit rPA mit 2 mm Probendicke.....	271
Abbildung 12.14:	komplexe Viskosität der Compounds aus rPP roh und zerkleinertem Spuckstoff gemessen an Probekörpern mit 1 mm Dicke	272
Abbildung 12.15:	komplexe Viskosität der Compounds aus rPP 8103N und zerkleinertem Spuckstoff gemessen an Probekörpern mit 1 mm Dicke	272

Abbildung 12.16: Vergleich der komplexen Viskosität der ungefüllten Neu- und Recyclingmaterialien	273
Abbildung 12.17: TGA- und abgeleitete TGA-Kurve des Arbofill ...	273
Abbildung 12.18: TGA- und abgeleitete TGA-Kurve des Agriplast	274
Abbildung 12.19: Viskositätskurven der Referenzmaterialien gemessen an Probekörpern mit 2 mm Dicke	274
Abbildung 12.20: zweite Aufheizkurve (basislinienkorrigiert) der Compounds aus PP und 30 w-% Spuckstoff (z.T. gereinigt oder gezielt mit Holz kontaminiert)	275
Abbildung 12.21: zweite Aufheizkurve der Compounds aus PP und 30 w-% Spuckstoff, der z.T. mittels Extraktion gereinigt wurde.....	275
Abbildung 12.22: Viskositätskurven der Compounds mit PP und zerkleinertem bzw. nicht zerkleinertem Spuckstoff	276
Abbildung 12.23: Viskositätskurven der Compounds mit rPP roh und zerkleinertem bzw. nicht zerkleinertem Spuckstoff	276
Abbildung 12.24: Fließweglänge der Compounds mit rPP roh und zerkleinertem bzw. nicht zerkleinertem Spuckstoff in Abhängigkeit vom Füllstoffgehalt bei verschiedenen Einspritzdrücken	277
Abbildung 12.25: Viskositätskurven der Compounds aus rPP 8103N und zerkleinertem bzw. nicht zerkleinertem Spuckstoff.....	277
Abbildung 12.26: Fließweglänge der Compounds mit rPP 8103N und zerkleinertem bzw. nicht zerkleinertem Spuckstoff in Abhängigkeit vom Füllstoffgehalt bei verschiedenen Einspritzdrücken	278
Abbildung 12.27: Viskositätskurven der Compounds aus rPP 8T223N und zerkleinertem bzw. nicht zerkleinertem Spuckstoff.....	278
Abbildung 12.28: Fließweglänge der Compounds mit rPP 8T223N und zerkleinertem bzw. nicht zerkleinertem Spuckstoff in Abhängigkeit vom Füllstoffgehalt bei verschiedenen Einspritzdrücken	279
Abbildung 12.29: Viskositätskurven der Compounds aus PA und zerkleinertem bzw. nicht zerkleinertem Spuckstoff	279
Abbildung 12.30: Fließweglänge der Compounds mit PA und zerkleinertem bzw. nicht zerkleinertem Spuckstoff	

	in Abhängigkeit vom Füllstoffgehalt bei verschiedenen Einspritzdrücken.....	280
Abbildung 12.31:	Viskositätskurven der Compounds aus rPA und zerkleinertem bzw. nicht zerkleinertem Spuckstoff 280	
Abbildung 12.32:	Fließweglänge der Compounds mit rPA und zerkleinertem bzw. nicht zerkleinertem Spuckstoff in Abhängigkeit vom Füllstoffgehalt bei verschiedenen Einspritzdrücken.....	281
Abbildung 12.33:	Dehnung der Compounds mit PP und MAPP in Abhängigkeit vom Füllstoffgehalt.....	281
Abbildung 12.34:	TGA--Kurve der Messreihe PP/0,1x MAPP	282
Abbildung 12.35:	abgeleitete TGA--Kurve der Messreihe PP/0,1x MAPP	282
Abbildung 12.36:	Viskositätskurven ausgewählter Compounds der Messreihen PP ohne MAPP, PP/0,1x MAPP und PP/3 MAPP	283
Abbildung 12.37:	kostenbezogene Eigenschaften der Compounds aus PP, 10 w-% Spuckstoff und z.T. MAPP	283
Abbildung 12.38:	kostenbezogene Eigenschaften der Compounds aus PP, 50 w-% Spuckstoff und z.T. MAPP	284

11.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Von JULIUS vorgeschlagene Sortiervverfahren zur Trennung von Papier und Kunststoffen aus Hausmüll [13] 9	9
Tabelle 3.1:	Exemplarische Werte für den Heizwert, den Wassergehalt und den Aschegehalt verschiedener Rückstände aus der Altpapieraufbereitung nach [38]	26
Tabelle 3.2:	Zusammenfassung des Stands der Wissenschaft....	33
Tabelle 4.1:	Probekörperabmessungen Typ 1BB im Vergleich mit Typ 1A und 1B; alle Angaben in mm [59].....	36
Tabelle 4.2:	Probekörperabmessungen Typ 3 im Vergleich mit Typ 1 und 2, alle Angaben in mm [60]	36
Tabelle 4.3:	Prüfverfahren nach DIN EN ISO 846-1997 [71]	50
Tabelle 4.4:	Verwendete Prüfpilze	51
Tabelle 4.5:	Bewertungsschema nach DIN EN ISO 846 [71]	51
Tabelle 4.6:	Methoden zur Bestimmung der Faserdimensionen ..	52
Tabelle 5.1:	Mit der Halse-Methode und der Delignifizierung bestimmte Ligningehalte	60
Tabelle 6.1:	Materialdatenblatt H734-52RNA nach [80]	66
Tabelle 6.2:	Mischungsverhältnisse und zugehörige Einwaagen zur Herstellung der Compounds	67
Tabelle 6.3:	Zur Compoundierung verwendete Temperaturen	68
Tabelle 6.4:	Für den Spritzgussprozess eingestellte Temperaturprofile	69
Tabelle 6.5:	Achsenabschnitt a, Steigung b und daraus bestimmter E-Modul des Füllstoffes.....	71
Tabelle 6.6:	HANSEN-Parameter von PP, PA und Cellulose (selbst berechnete Werte kursiv dargestellt)	74
Tabelle 6.7:	Marktpreise für PP und PA, Dezember 2018 [90].....	96
Tabelle 6.8:	Kostenkalkulation für eine Fassade aus PP-Spuckstoff-Compounds	104
Tabelle 6.9:	Materialkennwerte der Recyclingkunststoffe nach [[99], [100], [101]]	111
Tabelle 6.10:	Für den Spritzgussprozess eingestellte Temperaturprofile	112
Tabelle 6.11:	Preise für die Recyclingkunststoffe (* nach [90];** nach [91])	129
Tabelle 6.12:	Bauteilkosten für ein Fassadenverkleidungselement und eine Aufbewahrungsbox aus Compounds mit 40 w-% Spuckstoffanteil	131

Tabelle 6.13:	Materialdaten der kommerziellen Referenzmaterialien [[109], [110], [111]].....	133
Tabelle 6.14:	Marktpreise der verwendeten, kommerziell erhältlichen NFK Stand 2019	148
Tabelle 6.15:	Menge, Preise und Umsätze der EU- Faserflachswirtschaft im Jahr 2003 nach [98]	149
Tabelle 7.1:	Absorptionsbanden der Extrakte aus der Extraktion mit Methanol, Ethanol, Aceton und n-Hexan.....	160
Tabelle 7.2:	Empirischer Polaritätsfaktor E_T^N [125] und Masseabnahme während der Extraktion	161
Tabelle 7.3:	HANSEN-Parameter der Lösungsmittel und möglicher Bestandteile des Spuckstoffes (selbst berechnete Werte sind kursiv dargestellt)	162
Tabelle 7.4:	Zusammensetzung des Spuckstoffs an verschiedenen Produktionstagen [[75]];	178
Tabelle 7.5:	Probenzusammensetzungen der Compounds aus Spuckstoff, PP und MAPP	194

12 Anhang

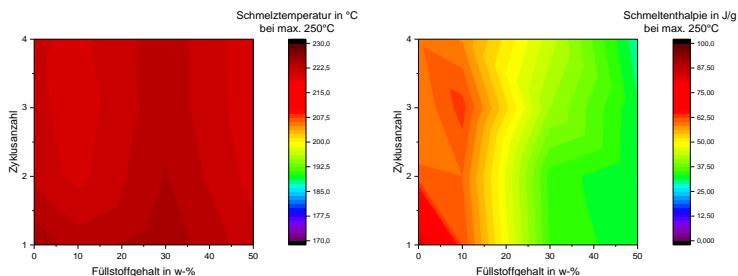


Abbildung 12.1: Schmelztemperatur (links) und -enthalpie (rechts) der PA-Compounds bei 250 °C Maximaltemperatur

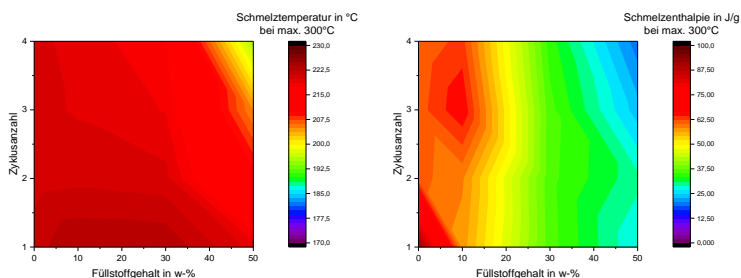


Abbildung 12.2: Schmelztemperatur (links) und -enthalpie (rechts) der PA-Compounds bei 300 °C Maximaltemperatur

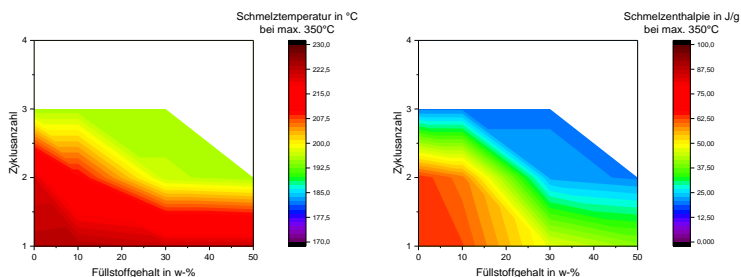


Abbildung 12.3: Schmelztemperatur (links) und -enthalpie (rechts) der PA-Compounds bei 350 °C Maximaltemperatur

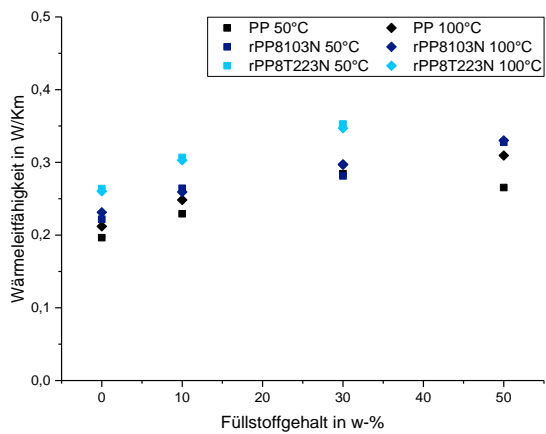


Abbildung 12.4: Grafischer Vergleich der Wärmeleitfähigkeiten der Compounds mit rPP und PP

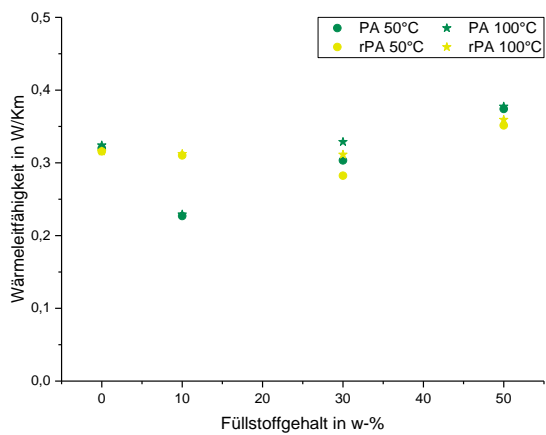


Abbildung 12.5: Grafischer Vergleich der Wärmeleitfähigkeiten der Compounds mit rPA und PA

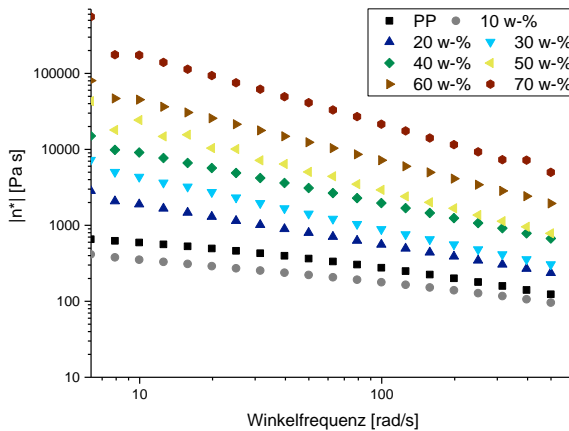


Abbildung 12.6: komplexe Viskosität der Compounds aus PP und zerkleinertem Spuckstoff gemessen an Probekörpern mit 1 mm Dicke

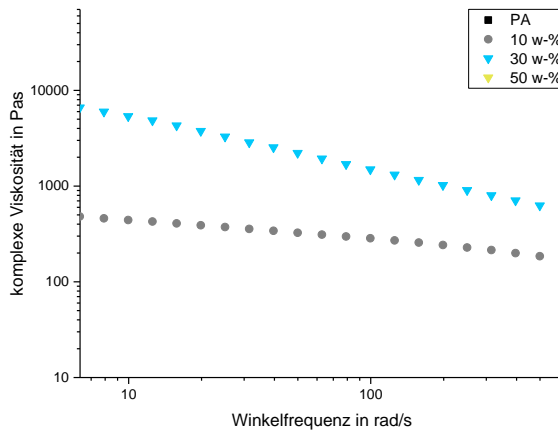


Abbildung 12.7: komplexe Viskosität der Compounds aus PA und zerkleinertem Spuckstoff gemessen an Probekörpern mit 1 mm Dicke



		Teilekalkulation		www.SpritzgussWeb.de mail@spritzgussweb.de	
www.SpritzgussWeb.de		Datum: 22. Januar 2019			
Artikel: Fassadenverkleidung		Maschine: 320 C		Kunde:	
Schußgewicht	90 Gramm	Anzahl Teile	65,45454545	Stück / Std	
Teilgewicht	80 Gramm	Anzahl Teile	916,3636364	Stück / Tag	
Anzahl Formnest	1 Stk				
Materialeinzelkosten	0,990 Euro/kg				
Maschinen-Kosten					
Invest. Maschine	300.000,00 Euro	Abschreibung	9,32	€/ Std.	
Abschreibung Masch.	10 Jahre	Zinskosten	4,66	€/ Std.	
Aufstellfläche Masch.	3,1 m ²	Miete	0,28	€/ Std.	
Anschlußwert	63 KW	Strom	1,89	€/ Std.	
1-2-3 Schicht-Betrieb	2 Schicht	Kühlung	1,20	€/ Std.	
Instandhaltung %	4 von *	Instandhaltung	3,73	€/ Std.	
Kühlwasser	1 m ³ /Std.	Maschinenstundensatz	21,07	€/ Std.	
Kühlwasserpreis	1,2 Euro/m ³				
Invest. Werkzeug	10.000,00 Euro	Werkzeugkosten	2,86	€/ Std.	
Abschreibung Werkz.	1 Jahre				
Kompressor Luft	1 m ³ /Std.	Betriebskosten: Luft	1,00	€/ Std.	
Preis Luft	1 Euro/m ³	Werkzeugthermierung	0,50	€/ Std.	
Thermiergerät	0,5 Euro/Std.	Lohnkosten	30,00	€/ Std.	
Lohn Arbeiter	30 Euro/Std.				
Arbeiter	1 Anzahl	Materialkosten	5,87	€/ Std.	
Zyklus in Sekunden	55 Sekunden				
Zinswert f. Abschr.	10,00 %	H-Kosten pro 1000 Teile	996,43	€	
Laufzeit Std. pro Tag	14 Std.	H-Kosten pro Teil	0,94	€	
Mietkosten Monat	12 Euro/m ²	Gewinn/Gemeinkosten	0,47	€/ Teil	
Strom Preis	0,06 Euro/KWh	Anteil Anguß	10	Gramm	
Gewinn/Gemeinkosten	50 %	Teilekosten	1,4046	€	
		Kosten	1,40	€/ Schuss	
		Materialaufwand	82,473	KG / Tag	
		Materialaufwand	82,14	€/ Tag	
* Instandhaltung 1 Schicht 3 % vom Maschinen-Neupreis 2 Schicht 4 % vom Maschinen-Neupreis 3 Schicht 5 % vom Maschinen-Neupreis					
Stromverbrauch durchschnittlich 50% vom Anschlußwert					
©SpritzgussWeb		www.SpritzgussWeb.de			
Fehler oder Verbesserungen bitte an: mail@spritzgussweb.de Kennwort für Blattschutz anfordern: mail@spritzgussweb.de Programm darf kopiert und weitergegeben werden. Copyright und Quellenweis dürfen nicht entfernt werden.					

Abbildung 12.8: Kalkulationstabelle für das Beispiel der Fassadenverkleidung aus dem Compound mit 40 w-% Spuckstoff und 60 w-% PP

		Teilekalkulation		www.SpritzgussWeb.de mail@spritzgussweb.de	
www.SpritzgussWeb.de		Datum: 22. Januar 2019			
Artikel:		Maschine:		Kunde:	
Aufbewahrungsbox		320 C			
Schußgewicht	78	Gramm	Anzahl Teile	65,45454545	Stück / Std
Teilgewicht	78	Gramm	Anzahl Teile	916,3636364	Stück / Tag
Anzahl Formnester	1	Stk.			
Materialkosten	1,057	Euro/kg			
Maschinen-Kosten					
Invest. Maschine	300.000,00	Euro	Abschreibung	9,32	€ / Std.
Abschreibung Masch.	10	Jahre	Zinskosten	4,66	€ / Std.
Aufstellfläche Masch.	3,1	m2	Miete	0,28	€ / Std.
Anschlußwert	63	KW	Strom	1,89	€ / Std.
1-2-3 Schicht-Betrieb	2	Schicht	Kühlung	1,20	€ / Std.
Instandhaltung %	4	von *	Instandhaltung	3,73	€ / Std.
Kühlwasser	1	m3/Std.	Maschinenstundensatz	21,07	€ / Std.
Kühlwasserpreis	1,2	Euro/m3			
Werkzeugkosten					
Invest. Werkzeug	25.000,00	Euro	Betriebskosten: Luft	1,00	€ / Std.
Abschreibung Werkz.	1	Jahre	Werkzeugthermperierung	0,50	€ / Std.
			Lohnkosten	30,00	€ / Std.
Kompressor Luft	1	m3/Std.			
Preis Luft	1	Euro/m3			
Thermperiergerät	0,5	Euro/Std.			
Lohn Arbeiter	30	Euro/Std.			
Arbeiter	1	Anzahl			
Materialkosten					
Zyklus in Sekunden	55	Sekunden	H-Kosten pro 1000 Teile	994,71	€
Zinswert f. Abschr.	10,00	%	H-Kosten pro Teil	0,99	€
Laufzeit Std. pro Tag	14	Std.	Gewinn/Gemeinkosten	0,50	€ / Teil
Mietkosten Monat	12	Euro/m2	Anteil Anguß	0	Gramm
Strom Preis	0,06	Euro/KWh			
Gewinn/Gemeinkosten	50	%			
Teilekosten					
				1,4921	€
				1,49	€ / Schuss
Materialaufwand					
				71,476	KG / Tag
				75,55	€ / Tag

* Instandhaltung 1 Schicht 3 % vom Maschinen-Neupreis
 2 Schicht 4 % vom Maschinen-Neupreis
 3 Schicht 5 % vom Maschinen-Neupreis

Stromverbrauch durchschnittlich 50% vom Anschlußwert

©SpritzgussWeb

www.SpritzgussWeb.de

Fehler oder Verbesserungen bitte an: mail@spritzgussweb.de
 Kennwort für Blattschutz anfordern: mail@spritzgussweb.de
 Programm darf kopiert und weitergegeben werden.
 Copyright und Quellenhinweis dürfen nicht entfernt werden.

Abbildung 12.9: Kalkulationstabelle für das Beispiel der Aufbewahrungsbox aus dem Compound mit 30 w-% Spuckstoff und 70 w-% PP

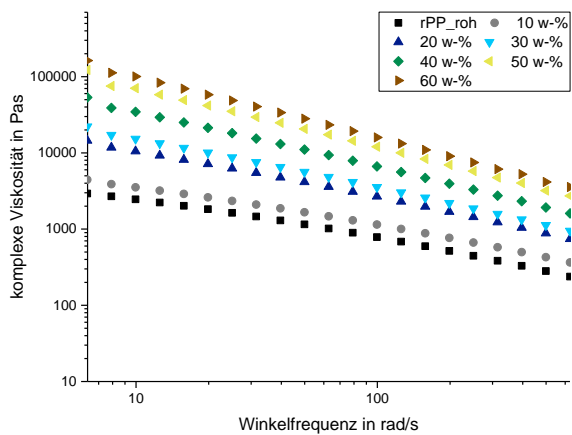


Abbildung 12.10: komplexe Viskosität der Compounds mit rPP roh mit 2 mm Probendicke

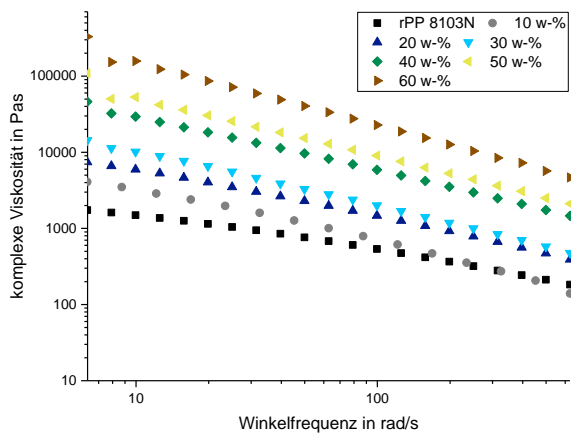


Abbildung 12.11: komplexe Viskosität der Compounds mit rPP 8103N mit 2 mm Probendicke

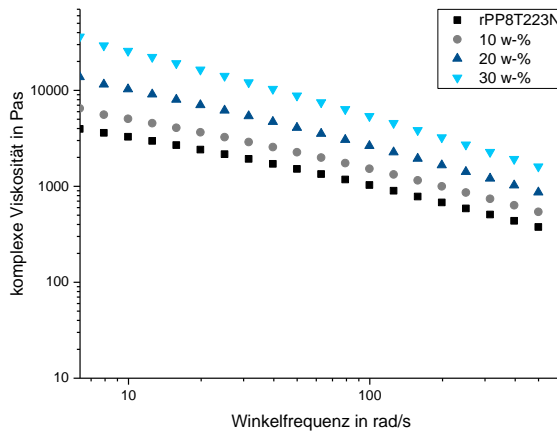


Abbildung 12.12: komplexe Viskosität der Compounds mit rPP 8T223N mit 2 mm Probendicke

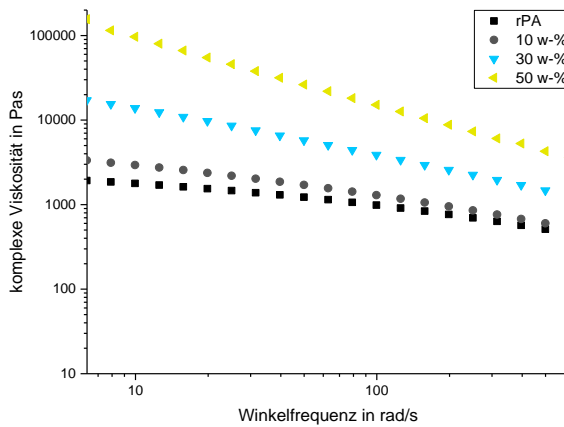


Abbildung 12.13: komplexe Viskosität der Compounds mit rPA mit 2 mm Probendicke

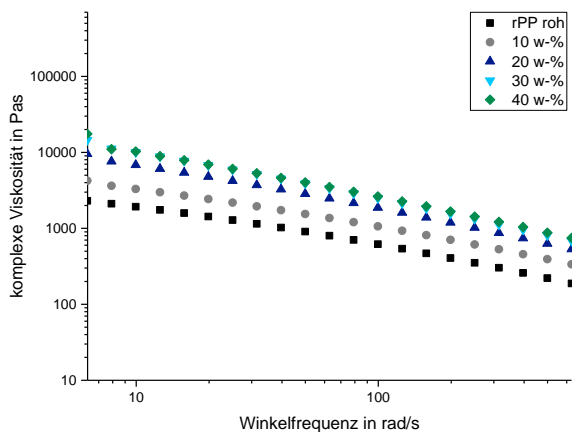


Abbildung 12.14: komplexe Viskosität der Compounds aus rPP roh und zerkleinertem Spuckstoff gemessen an Probekörpern mit 1 mm Dicke

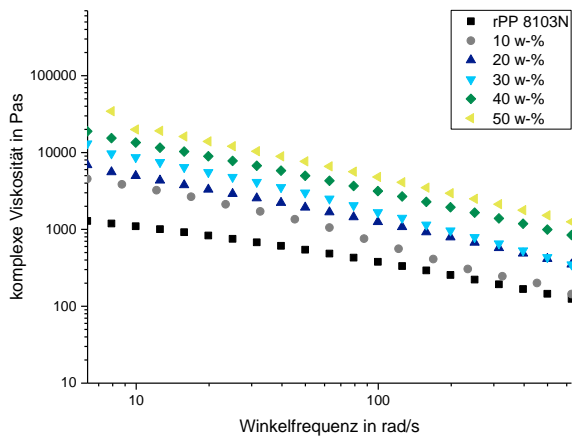


Abbildung 12.15: komplexe Viskosität der Compounds aus rPP 8103N und zerkleinertem Spuckstoff gemessen an Probekörpern mit 1 mm Dicke

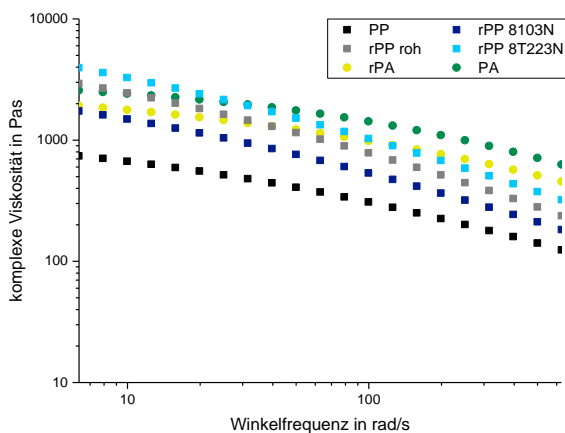


Abbildung 12.16: Vergleich der komplexen Viskosität der ungefüllten Neu- und Recyclingmaterialien

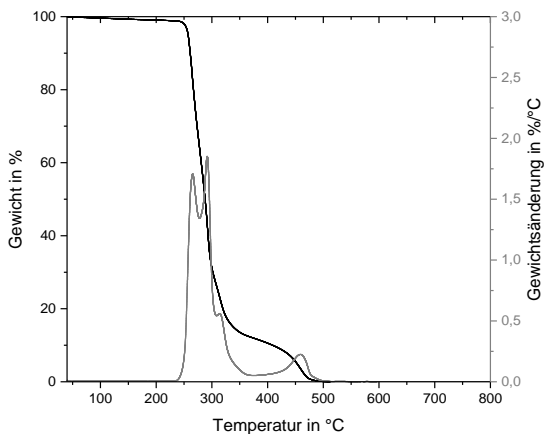


Abbildung 12.17: TGA- und abgeleitete TGA-Kurve des Arbofill

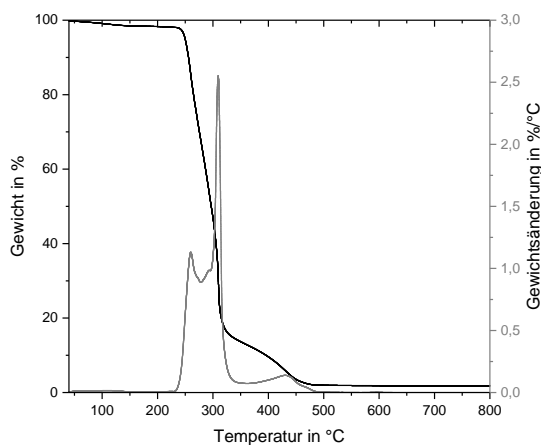


Abbildung 12.18: TGA- und abgeleitete TGA-Kurve des Agriplast

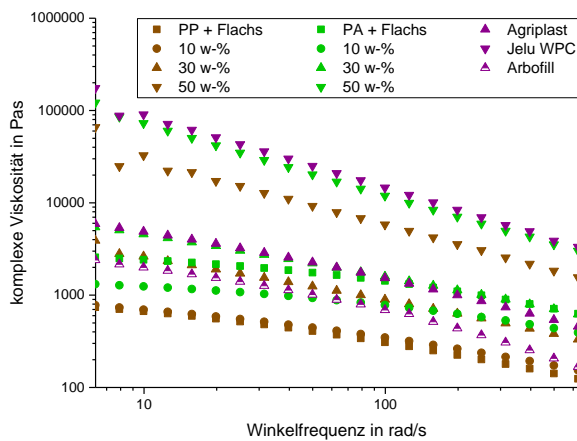


Abbildung 12.19: Viskositätskurven der Referenzmaterialien gemessen an Probekörpern mit 2 mm Dicke

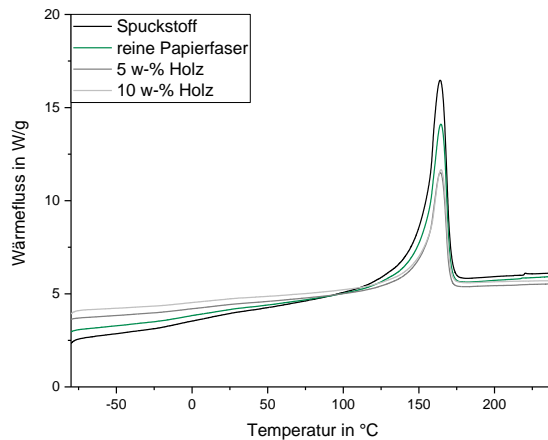


Abbildung 12.20: zweite Aufheizkurve (basislinienkorrigiert) der Compounds aus PP und 30 w-% Spuckstoff (z.T. gereinigt oder gezielt mit Holz kontaminiert)

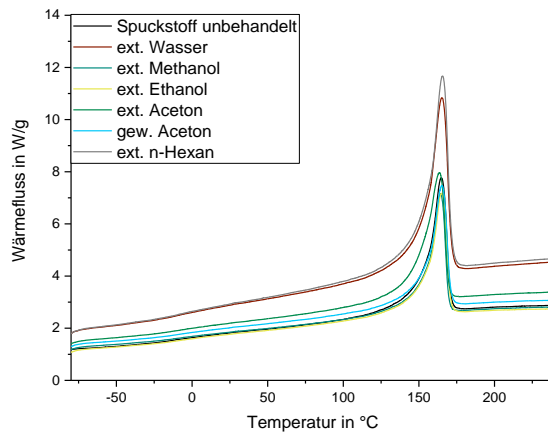


Abbildung 12.21: zweite Aufheizkurve der Compounds aus PP und 30 w-% Spuckstoff, der z.T. mittels Extraktion gereinigt wurde

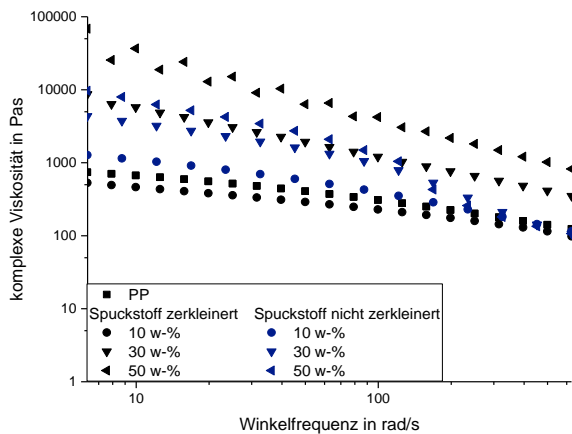


Abbildung 12.22: Viskositätskurven der Compounds mit PP und zerkleinertem bzw. nicht zerkleinertem Spuckstoff

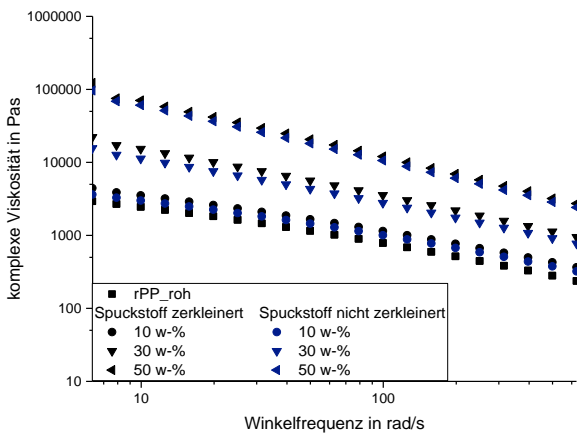


Abbildung 12.23: Viskositätskurven der Compounds mit rPP roh und zerkleinertem bzw. nicht zerkleinertem Spuckstoff

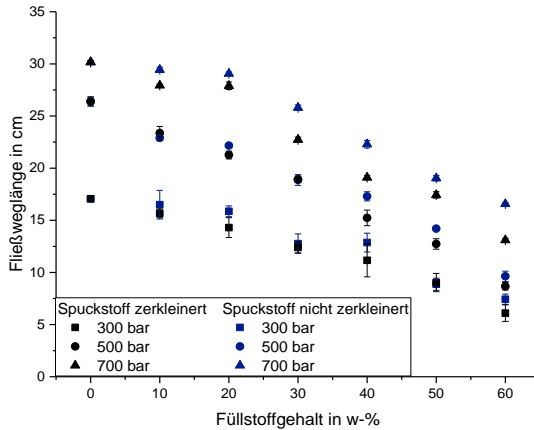


Abbildung 12.24: Fließweglänge der Compounds mit rPP roh und zerkleinertem bzw. nicht zerkleinertem Spuckstoff in Abhängigkeit vom Füllstoffgehalt bei verschiedenen Einspritzdrücken

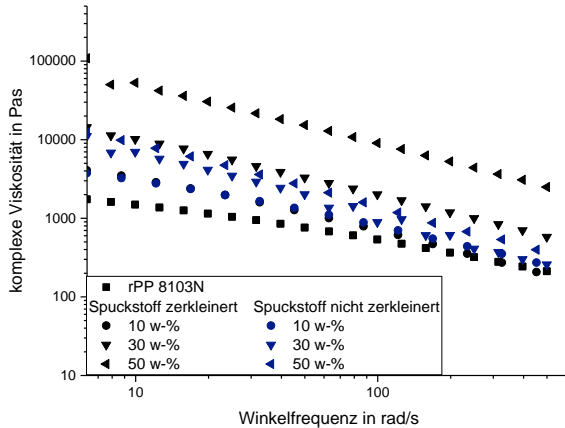


Abbildung 12.25: Viskositätskurven der Compounds aus rPP 8103N und zerkleinertem bzw. nicht zerkleinertem Spuckstoff

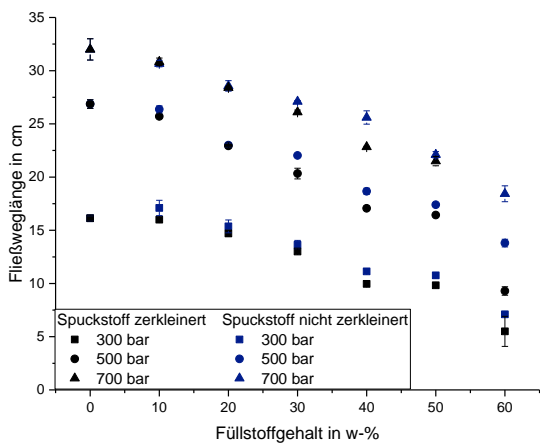


Abbildung 12.26: Fließweglänge der Compounds mit rPP 8103N und zerkleinertem bzw. nicht zerkleinertem Spuckstoff in Abhängigkeit vom Füllstoffgehalt bei verschiedenen Einspritzdrücken

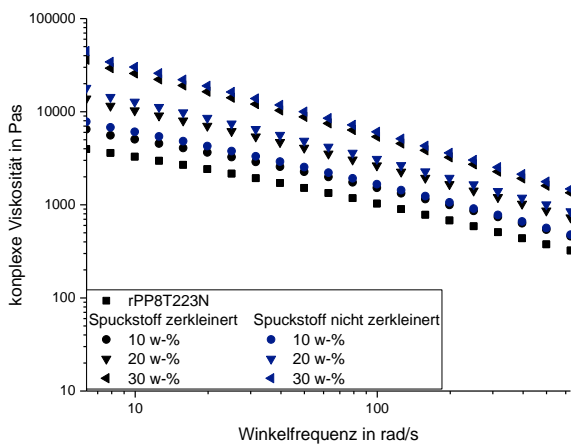


Abbildung 12.27: Viskositätskurven der Compounds aus rPP 8T223N und zerkleinertem bzw. nicht zerkleinertem Spuckstoff

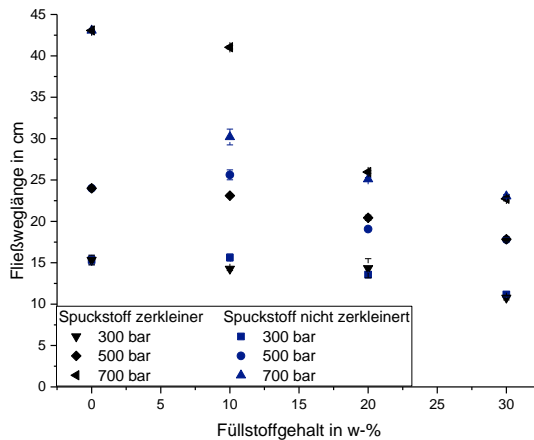


Abbildung 12.28: Fließweglänge der Compounds mit rPP 8T223N und zerkleinertem bzw. nicht zerkleinertem Spuckstoff in Abhängigkeit vom Füllstoffgehalt bei verschiedenen Einspritzdrücken

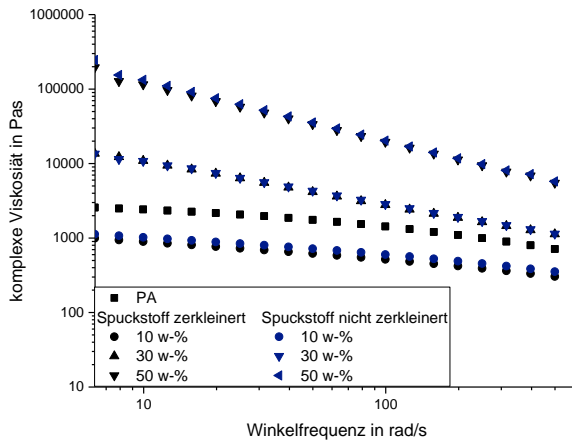


Abbildung 12.29: Viskositätskurven der Compounds aus PA und zerkleinertem bzw. nicht zerkleinertem Spuckstoff

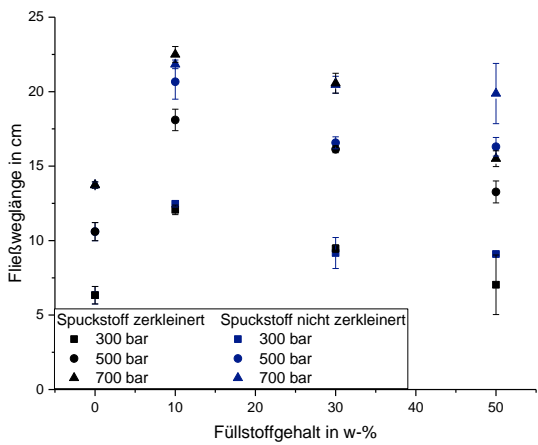


Abbildung 12.30: Fließweglänge der Compounds mit PA und zerkleinertem bzw. nicht zerkleinertem Spuckstoff in Abhängigkeit vom Füllstoffgehalt bei verschiedenen Einspritzdrücken

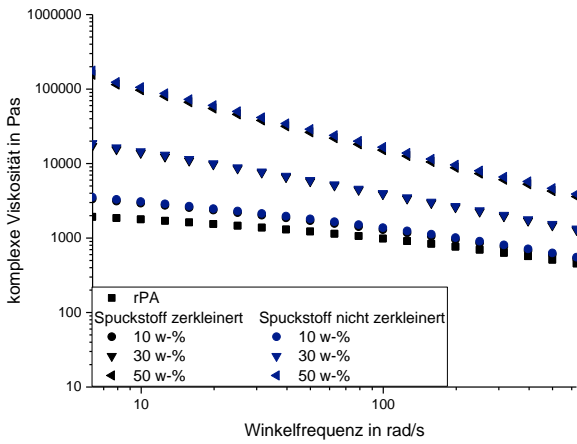


Abbildung 12.31: Viskositätskurven der Compounds aus rPA und zerkleinertem bzw. nicht zerkleinertem Spuckstoff

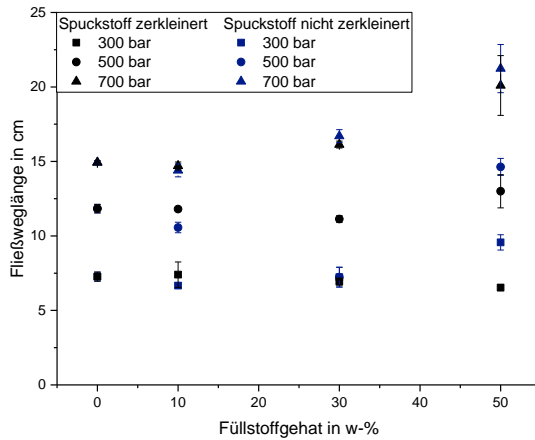


Abbildung 12.32: Fließweglänge der Compounds mit rPA und zerkleinertem bzw. nicht zerkleinertem Spuckstoff in Abhängigkeit vom Füllstoffgehalt bei verschiedenen Einspritzdrücken

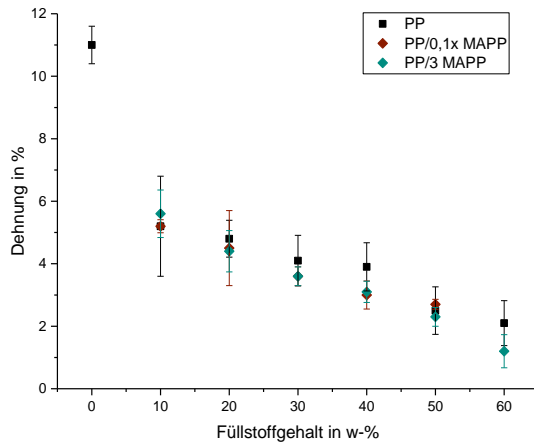


Abbildung 12.33: Dehnung der Compounds mit PP und MAPP in Abhängigkeit vom Füllstoffgehalt

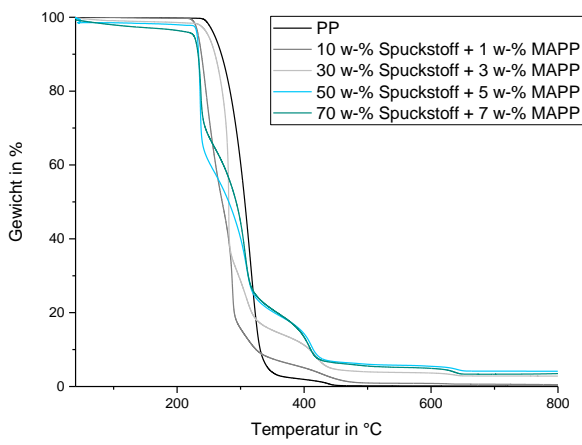


Abbildung 12.34: TGA-Kurve der Messreihe PP/0,1x MAPP

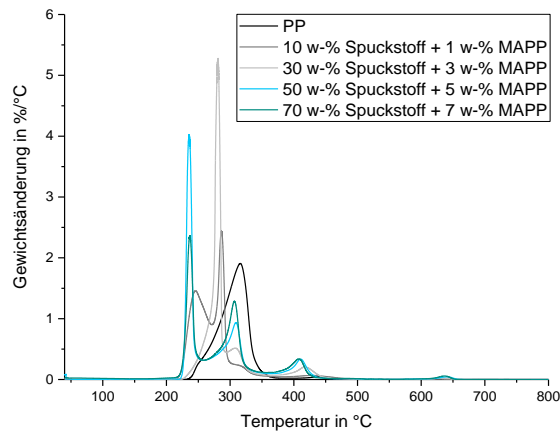


Abbildung 12.35: abgeleitete TGA-Kurve der Messreihe PP/0,1x MAPP

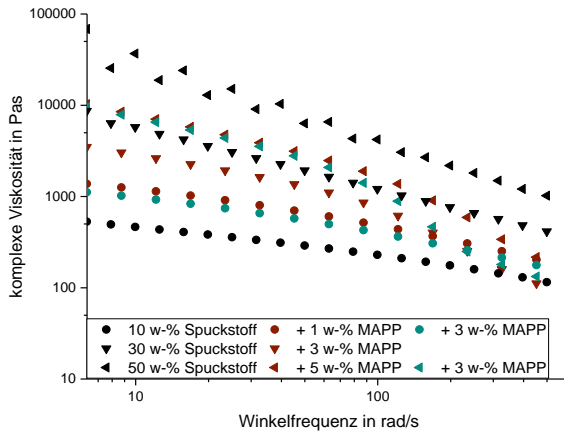


Abbildung 12.36: Viskositätskurven ausgewählter Compounds der Messreihen PP ohne MAPP, PP/0,1x MAPP und PP/3 MAPP

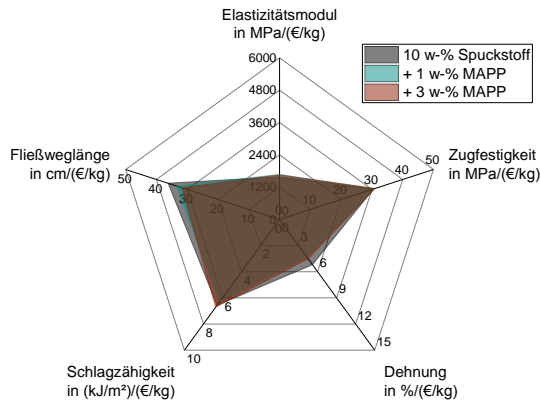


Abbildung 12.37: kostenbezogene Eigenschaften der Compounds aus PP, 10 w-% Spuckstoff und z.T. MAPP

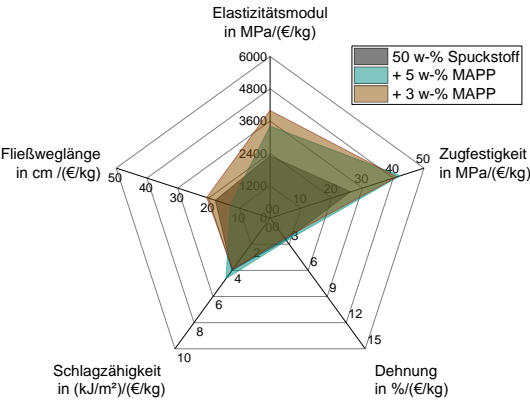


Abbildung 12.38: kostenbezogene Eigenschaften der Compounds aus PP, 50 w-% Spuckstoff und z.T. MAPP

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name	Andrea Franziska Katharina Scholten, geb. Malfatti
Geburtstag	18.02.1991
Geburtsort	München
Staatsangehörigkeit	deutsch-italienisch
Familienstand	verheiratet

Schulausbildung

1997 – 2001	Grundschule Süd, Walsrode
2001 – 2003	Orientierungsstufe, Walsrode
2003 – 2010	Gymnasium Walsrode, Walsrode
	Abitur mit Note 1,5

Studium

10/2010 – 09/2013	Technische Universität Clausthal Bachelorstudium Materialwissenschaft und Werkstofftechnik Abschlussnote 1,5
04/2013 – 04/2015	Technische Universität Clausthal Masterstudium Materialwissenschaft Abschlussnote 1,3
Seit 05/2015	Technische Universität Clausthal Fakultät für Natur- und Materialwissenschaften Institut für Polymerwerkstoffe und Kunststofftechnik Promotionsstudium Materialwissenschaft und Werkstofftechnik

Beruflicher Werdegang

10/2011 – 04/2015	Technische Universität Clausthal Hilfskraft u.a. im Gleichstellungsbüro, am Institut für Energieforschung und Physikalische Technologien, und am Institut für Polymerwerkstoffe und Kunststofftechnik
05/2015 – 12/2018	Technische Universität Clausthal Institut für Polymerwerkstoffe und Kunststofftechnik Wissenschaftliche Mitarbeiterin
Seit 02/2019	Horn & Bauer Folientechnik GmbH & Co. KG Entwicklerin und Anwendungstechnikerin

Veröffentlichungen

Projektarbeiten

A. Malfatti : „Untersuchung von kohlenstofffaserverstärkten Epoxidharzen mittels Laser-Flash-Apparatur“

A. Malfatti: „Erzeugung stabiler Magnetit-Nanopartikel-Dispersionen und Funktionalisierung der Nanopartikel zur Herstellung von Nano@Mikropartikeln“

A. Malfatti: „Untersuchung der Wasserdampfdurchlässigkeit und der Wasseraufnahme verschiedener Polyurethanfolien“

Bachelorarbeit

A. Malfatti : „Hochskalierung des Herstellungsprozesses von weichmagnetischen nanostrukturierten Eisen-Silizium-Mikropartikeln und Verarbeitung zu Thermoplast-Kompositen

Masterarbeit

A. Malfatti: „Evaluation neuer Haftvermittlersysteme für flachsfaserverstärktes Polypropylen“

Wissenschaftliche Veröffentlichungen

G.-P. Brunotte, **A. Malfatti**, G. Ziegmann, D. Meiners: „Synthese magnetischer Nano@Mikropartikel zur Herstellung spritzgegossener Kunststoff-Partikel-Kompositen mit funktionellen Eigenschaften“, Symposium Polymermischungen 15. Problemseminar 2014 Polymerblends und Nanocomposites, 5. und 6. März 2014 in Halle (Saale)

A. Malfatti, L. Steuernagel, D. Meiners: „Flachsfaserverstärktes Polypropylen mit erhöhter Charpy-Schlagzähigkeit durch Einsatz potentieller Haftvermittler“, Zeitschrift Kunststofftechnik / Journal of Plastics Technology 12 (2016) 2

A. Malfatti, L. Steuernagel, D. Meiners: „Improvement of mechanical properties due to increased fibre matrix adhesion in flax fibre reinforced polypropylene“, 32nd International Conference of the Polymer Processing Society, 25. – 29. Juli 2016 in Lyon

A. Scholten, D. Meiners: „Use of recycled waste paper as fiber reinforcement for polypropylene – relationship of fiber extraction process and mechanical properties of the composites“, Europe Africa Conference of the Polymer Processing Society 2017, 26. – 29. Juni 2017 in Dresden

A. Scholten, N. Plogmann, D. Meiners: “Use of recycled waste paper as fiber reinforcement for polypropylene – Examination of mechanical properties in

comparison to NFRP", 21. Symposium Verbundwerkstoffe, 05.–07. Juli 2017 in Bremen, DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.742.25

A. Scholten, S.-B. Lür, D. Meiners: „Verwendung eines Spuckstoffs aus dem Papierrecycling als Füllstoff für thermoplastische Kunststoffe – Einfluss des Aufbereitungsgrades und der Füllstoffzusammensetzung auf die mechanischen Eigenschaften des Compounds“, Berichtsband Clausthaler Zentrum für Materialtechnik 2016 – 2017, ISBN 978-3-8440-6294-6

A: Scholten, D. Meiners: „Verwendung eines Spuckstoffs aus dem Papierrecycling als Füllstoff für thermoplastische Kunststoffsysteme“, Recy & DepoTech 2018, 07. - 09. November 2018 in Leoben